Liviu JALBĂ, Dumitru STANOMIR,
Octavian STĂNĂŞILĂ

FIZICĂ PENTRU NEPOȚI

- CARTE DE ÎNVĂȚĂTURĂ -

COLECȚIA ALMA MATER STUDIORUM

București, 2015

Floarea Darurilor
Fundatie

Culegerea textului și tehnoredactarea

Luminița Cătănuș

Anamaria Pacea

Mădălina Florescu

Colaborator științific: dr.ing.mat. Eleodor Bistriceanu

Tipărită la Regia Autonomă Monitorul Oficial București, ROMÂNIA, în 1000 exemplare.

ISBN 978-973-0-19285-8

Volumul al II-lea

FENOMENE ELECTRICE ȘI MAGNETICE
FENOMENE OPTICE
FENOMENE ONDULATORII

CUPRINSUL VOLUMULUI al II-lea

PARTEA I - TEORIE ȘI EXEMPLE

CAPITOLUL 3: FENOMENE ELECTRICE ȘI MAGNETICE pag. 11

§1. ELECTROSTATICĂ, LEGEA LUI COULOMB pag. 11

§2. CURENTUL ELECTRIC pag. 23

§3. EFECTUL TERMIC ȘI EFECTUL CHIMIC AL CURENTULUI ELECTRIC pag. 38

§4. CALCULUL REZISTENȚELOR ELECTRICE ȘI LEGILE LUI KIRCHHOFF pag. 48

§5. FENOMENE MAGNETICE pag. 59

§6. CURENTUL ELECTRIC ALTERNATIV pag. 75

CAPITOLUL 4: FENOMENE OPTICE pag. 101

§1. LEGILE REFLEXIEI ȘI REFRACȚIEI pag. 102

§2. OGLINZI pag. 112

§3. LENTILE pag. 121

§4. INSTRUMENTE OPTICE pag. 130

§5. ALTE FENOMENE OPTICE pag. 141

CAPITOLUL 5: FENOMENE ONDULATORII pag. 147

§1. OSCILAȚII ȘI VIBRAȚII pag. 148

§2. UNDE pag. 159

§3. PROPRIETĂȚILE ONDULATORII ALE LUMINII pag. 174

§4. UNDE ELECTROMAGNETICE pag. 182

PARTEA a II-a
COMPLETĂRI, ÎNTREBĂRI ŞI RĂSPUNSURI

CAPITOLUL 3′: FENOMENE ELECTRICE ȘI MAGNETICE pag. 207

CAPITOLUL 4′: FENOMENE OPTICE pag. 223

CAPITOLUL 5′: FENOMENE ONDULATORII pag. 237

Indice de nume și de notații pag. 255

PARTEA I - TEORIE ȘI EXEMPLE

CAPITOLUL 3 - FENOMENE ELECTRICE ȘI MAGNETICE

Introducere

Forţele electrice, ca şi cele magnetice, au fost observate de mult timp, dar legile care le guvernează au fost descoperite abia în secolul al XIX-lea prin eforturile unor mari cercetători, precum Faraday, Maxwell, Hertz. Aceste forţe sunt prezente în structura atomilor, în curentul electric („focul ascuns”), în fenomene vizibile ale naturii şi chiar în fibrele nervoase ale animalelor. Curentul electric face lucru, transmite informaţie, are efecte termice sau chimice şi, împreună cu magnetismul, a condus la crearea Electronicii, care a „explodat” în secolul al XX-lea prin mari aplicaţii şi implicaţii – Radio, TV, Internet, Reţele de Telecomunicaţii ş.a., care continuă să ne domine existenţa.

§ 1. ELECTROSTATICĂ, LEGEA LUI COULOMB

1.1. Asupra noţiunii de câmp

Stările principale ale materiei sunt cele de **substanţă** şi de **câmp,** transmiţător de interacţii; ele corespund **acţiunii „directe”, respectiv acţiunii „la distanţă”**. A defini un **câmp vectorial** (≡câmp de vectori) într-o regiune *D* din spaţiu revine

la a asocia oricărui punct $M \in D$ un vector $\vec{v}(M)$ cu punctul de aplicaţie în *M*. Matematic, un câmp este o aplicaţie între două mulţimi $D \to V_3$, $M \mapsto \vec{v}(M)$ sau familia de vectori $\{\vec{v}(M)\}_{M \in D}$; similar, un **câmp scalar** φ este o aplicaţie $D \to \mathbb{R}, M \mapsto \varphi(M)$.

<u>Exemple.</u> 1) Câmpul gravitaţional al Pământului este un câmp vectorial, care asociază oricărui punct material *M*, acceleraţia gravitaţională $\vec{g}(M)$. Temperatura (sau mai corect, luarea temperaturii) şi umiditatea definesc câmpuri scalare.

2) Fie o particulă atractoare de masă *m*, plasată într-un punct *O* şi o altă masă *m'* într-un punct *M*≠*O*. Notăm $\vec{r} = \overrightarrow{OM}$ (vectorul de poziţie al lui *M*) şi $r = \|\vec{r}\|$. Atunci $\frac{\vec{r}}{r}$ este versorul lui $\vec{r}$. Forţa de atracţie newtoniană este $F = K \cdot \frac{mm'}{r^2}$ (formula (13) din Cap.I, 2.2). Notăm $Kmm' = a$, deci $F = \frac{a}{r^2}$ şi vectorial $\vec{F} = -F\frac{\vec{r}}{r} = -\frac{a}{r^3}\vec{r}$. Câmpul vectorial $\{\vec{F}(M)\}$ este tocmai **câmpul gravitaţional** creat de masa *m* în punctul *M*.

Mărimea $U(M) = \frac{a}{r}$ se numeşte **potenţialul newtonian** scalar, creat de *O* în punctul *M*.

3) Vom vedea că orice sarcină electrică generează un câmp vectorial în jurul ei, anume câmpul electrostatic.

Substanţa şi câmpul sunt noţiuni primare, aşa cum sunt corpurile, evenimentele, mulţimile, numerele, deci le luăm ca atare, fără a le mai defini. În substanţe, materia este concentrată, bine localizată şi, adeseori, la vedere. Dar suntem înconjuraţi de câmpuri – gravitaţional, electrostatic, electromagnetic etc., care nu pot fi pipăite sau văzute, dar materia există şi în acest caz, fiind delocalizată şi capabilă să transmită interacţiuni „prin contingenţă”.

Dacă avem în vedere un câmp vectorial $\vec{v}$, **liniile de câmp** (numite şi **linii de forţă**) ale lui $\vec{v}$ sunt curbe Γ, fără autointersecţii, cu proprietatea că în fiecare punct $M \in \Gamma$, vectorul $\vec{v}(M)$ al câmpului este tangent la Γ în acel punct (figura 3.1).

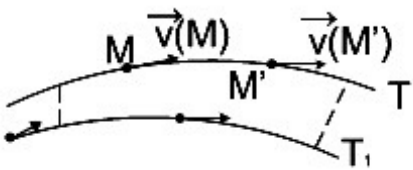


Fig. 3.1

Se presupun îndeplinite unele condiţii matematice de continuitate, derivabilitate, care asigură că prin fiecare punct din regiunea D trece o singură linie de câmp, neîntreruptă, având tangentă în fiecare punct al ei; orice două linii de câmp nu se intersectează. Liniile de câmp indică orientarea vectorilor câmpului. În Fizica modernă, nu se mai face o distincţie netă între câmpuri şi substanţe.

1.2. Legea lui Coulomb

Noţiunea de sarcină electrică este primară. Sarcinile electrice pot fi pozitive sau negative şi această calitate şi-o conservă permanent (există „legea conservării sarcinilor electrice”) atunci când sunt transferate de la un corp la altul.

Mărimea oricărei sarcini electrice se măsoară în coulombi [C]. Vom vedea imediat ce înseamnă 1 C.

Exemple. 1) S-a constatat că mătasea frecată pe ebonită generează sarcini pozitive („+”), iar pâsla pe chihlimbar – sarcini negative („–”). În greceşte, chihlimbarul se numeşte electron!

2) Atomii diverselor substanţe sunt neutri electric, dar electronii sunt purtători de sarcini „–”, iar protonii „+”. Fotonii nu au sarcină electrică. **Sarcina elementară** este $e = 1{,}6 \times 10^{-19} C$, aceasta fiind o altă constantă fizică fundamentală (alături de viteza luminii c, constanta gravitaţională notată K sau G, numărul N_A al lui Avogadro, masa electronului sau a protonului etc.). Electronii au sarcina $-e$, iar protonii $+e$.

Sarcinile pot fi transferate (de exemplu atingând un corp electrizabil cu unul deja electrizat, încărcat pozitiv sau negativ).

De exemplu, împământarea este un transfer de sarcini spre Pământ, care este încărcat electric.

Substanţele se împart în bune conducătoare de electricitate (de exemplu, metalele, sarea, Pământul, corpul

uman) şi dielectrici (ex. ebonita, sticla, chihlimbarul); izolatorii electrici folosesc dielectrici.

Formulăm acum o lege fundamentală a Electrostaticii:

LEGEA LUI COULOMB (a **forţei de interacţiune** dintre sarcini electrice): „Fie q şi q' două sarcini electrice punctuale aflate la distanţa r. Între ele se exercită o forţă de interacţiune (atracţie sau respingere), egală cu

$$F_{qq'} = \varepsilon \frac{qq'}{r^2}, \text{ unde } \varepsilon = \pm 9 \cdot 10^9 m^2 \cdot N / C^2 \qquad (1)$$

In formula (1) care exprimă forța de atracție, ε se numește constanta lui Coulomb. Această forță acționează în vid, în lungul dreptei care unește sarcinile punctuale și depinde de mediu (la fenomene ondulatorii electromagnetice vom preciza și alte forme de exprimare).

Ca în cazul multor altor legi, aceasta permite calculul unor mărimi fizice, cunoscând alte mărimi fizice. Aşadar, forţa $F_{qq'}$ este direct proporţională cu produsul mărimilor sarcinilor şi invers proporţională cu pătratul distanţei dintre ele. Semnul de dinaintea lui ε se fixează după regula următoare: mărimea forţei $F_{qq'}$ este totdeauna pozitivă, sarcinile de acelaşi semn se resping, iar cele de semn contrar se atrag.

Putem acum explica (estima) ce înseamnă 1 C. Anume, două sarcini identice situate la 1 m una de alta au mărimea 1 C, dacă forţa coulombiană dintre ele este 1 N.

Exemple:

1) Forţa de respingere a doi electroni situaţi la distanţa 1Å≡10^{-8}cm (Å=Angström) este

$$F = 9 \cdot 10^9 \times \frac{1{,}6^2 \times 10^{-38}}{(10^{-10})^2} \cong 23 \times 10^{-9} N .$$

2) Fie q=2 μC şi q'=−3 μC, două sarcini electrice situate la distanţa r=10 cm. Cele două sarcini se atrag cu forţa

$$F = 9 \cdot 10^9 \times \frac{6 \times 10^{-12}}{10^{-2}} \cong 5{,}4 N .$$

3) Până recent se considera că mărimea oricărei sarcini electrice este de forma Ne cu N întreg, dar s-au descoperit sarcini de mărime $e/3$ (quarci).

Notă: Există o similitudine între legea lui Coulomb (1) şi legea lui Newton a atracţiei universale dintre două mase. Dar există şi o diferenţă esenţială: forţa newtoniană este doar una de atracţie, iar cea coulombiană este şi de respingere (în cazul când sarcinile au acelaşi semn).

1.3. Câmpul electrostatic

Fie q o sarcină electrică punctuală, fixată. Vom nota tot cu q punctul unde este plasată. Pentru orice punct $M \neq q$, fie $\vec{r} = \overrightarrow{qM}$ şi $r = \|\vec{r}\|$ distanţa dintre q şi M.

Definiţie: **Câmpul electrostatic** generat de sarcina q este $\vec{E}_q = \{\vec{E}_q(M)\}$, pentru care

$$\vec{E}_q(M) = \varepsilon \frac{q}{r^3}\vec{r} \qquad (2)$$

Dacă sarcina q este „+” (respectiv „–”), atunci câmpul $\vec{E}_q(M)$ este coliniar şi are acelaşi sens (respectiv sens contrar) cu $\vec{r}$ (figura 3.2). Uneori renunţăm la indicele q.

Conform formulei (1), forţa care acţionează asupra unei sarcini $q' \neq q$ este $F = \varepsilon q' \frac{q}{r^2}$ şi vectorial $\vec{F} = F\frac{\vec{r}}{r}$ (ţinând cont că $\frac{\vec{r}}{r}$ este versorul lui $\vec{r}$), deci $\vec{F} = \varepsilon q' \frac{q}{r^3}\vec{r} = q'\vec{E}_q$.

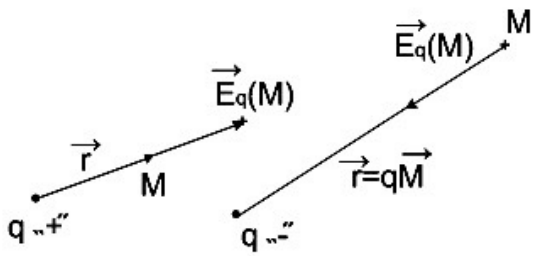


Fig. 3.2

O linie de câmp Γ a unui câmp arată ca în figura 3.3, dar, în acest caz, ele sunt semidrepte cu capătul în q. Liniile de câmp „ies” din sarcinile „+” şi „intră” în cele „–”.

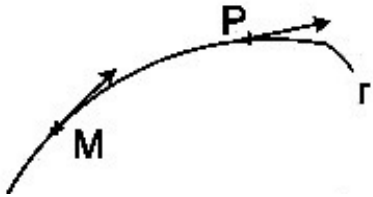


Fig. 3.3

Aşadar, oricărei sarcini i se asociază un câmp electrostatic şi dacă se suprapun două sau mai multe sarcini q_1, q_2,..., atunci câmpurile electrostatice asociate $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$,... se adună vectorial. **Câmpul electric** este obţinut prin suprapunerea multor câmpuri electrostatice aflate în mişcare.

Exemple: 1) Să considerăm două sarcini q_1, q_2 pozitive şi având aceeaşi mărime, măsurată în C.

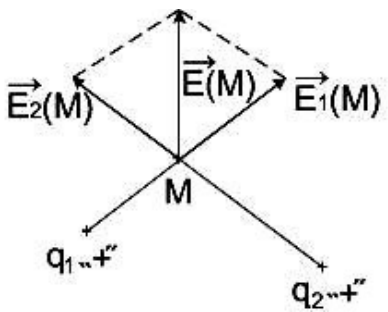


Fig. 3.4

Câmpul electrostatic asociat acestei perechi este $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$; pentru orice punct M, $\vec{E}(M) = \vec{E}_1(M) + \vec{E}_2(M)$, suma fiind făcută după regula paralelogramului (figura 3.4).

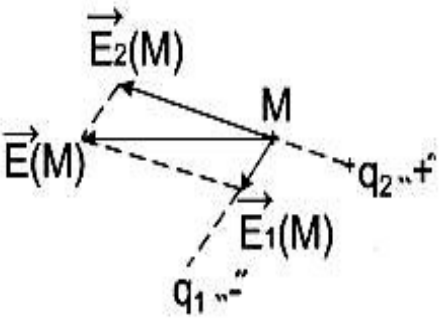


Fig. 3.5

2) Fie acum o sarcină negativă q_1 şi q_2=-2q_1. În acest caz, pentru orice punct M, $\vec{E}(M)$ arată ca în figura 3.5. În acest caz $\vec{E}(M)=\vec{E}_1(M)+\vec{E}_2(M)$.

Proprietăţile câmpului electrostatic

Pentru un câmp de forţe $\vec{F}$, se defineşte **lucrul mecanic elementar** prin produsul scalar $d\mathfrak{L}=\vec{F}\cdot d\vec{r}$, unde $d\vec{r}$ este vectorul–deplasare infinitezimală. În lungul unei curbe (≡drum) care uneşte două puncte A, B, **lucrul** este $\mathfrak{L}_{AB}=\int_{AB} d\mathfrak{L}=\int_{AB}\vec{F}\cdot d\vec{r}$ (≡suma lucrurilor elementare; semnul integrală „∫” este un fel de alungire şi netezire a semnului sumă „∑”).

Exemplu: Dacă $\vec{F}=\alpha\vec{r}$ (α fiind o constantă reală), atunci $\vec{F}\cdot d\vec{r}=\alpha\vec{r}\cdot d\vec{r}=\alpha r\cdot dr$ (căci diferenţiem relaţia $\vec{r}^2=r^2$). Aşadar, $\mathfrak{L}_{AB}=\int_{AB}\alpha r\cdot dr=\alpha\frac{r^2}{2}|_A^B=\frac{\alpha}{2}(r_B^2-r_A^2)$.

Fixând o sarcină electrică pozitivă q, forţa asupra unei sarcini q' este $\vec{F}=q'\vec{E}_q$, avem:

$$d\mathfrak{L}=\varepsilon\frac{qq'}{r^3}\vec{r}\cdot d\vec{r}=\varepsilon\frac{qq'}{r^3}rdr=\varepsilon\frac{qq'}{r^2}dr \text{ şi}$$

$$\mathfrak{L}_{AB}=\varepsilon q'\int_{AB}\frac{q}{r^2}dr=-\varepsilon\frac{qq'}{r}|_A^B=-\varepsilon\frac{qq'}{r_B}+\varepsilon\frac{qq'}{r_A}, \text{ (figura 3.6;a).}$$

Am demonstrat că:

1) Lucrul câmpului electrostatic pe orice drum (unind punctele A, B) nu depinde de drum.

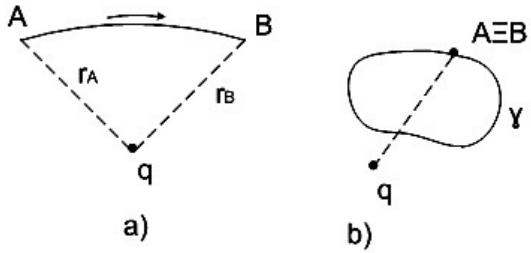


Fig. 3.6

2) În lungul unui drum închis care nu înconjoară sarcina q, lucrul câmpului electrostatic este nul (deoarece capetele A şi B coincid şi $r_A=r_B$). [Acest rezultat se mai formulează astfel: câmpul electrostatic este **conservativ**].

Definiţie: Fixăm o sarcină electrică pozitivă q. Pentru orice punct $M \neq q$, se notează r_M=distanţa de la q la M. Expresia

$$V_M = \varepsilon \frac{q}{r_M} \tag{3}$$

se numeşte **potenţialul electric** al sarcinii q în punctul M.

Funcţia $V : M \to V_M$ este un câmp scalar.

Aşadar, lucrul câmpului electrostatic, la deplasarea unei sarcini q', în lungul unui drum, unind punctele A şi B, este

$$\mathfrak{L}_{AB} = \varepsilon \frac{qq'}{r_A} - \varepsilon \frac{qq'}{r_B} = q'(V_A - V_B) \tag{4}$$

Dacă $B \to \infty$, atunci $r_B \to \infty$ şi $V_B \to 0$, deci:

3) Potenţialul sarcinii într-un punct A este egal cu lucrul $\mathfrak{L}_{A\infty}$ al sarcinii q' deplasate de la A la infinit, împărţit la q'.

Cele spuse anterior se refac pentru o sarcină negativă q şi V_A ar fi lucrul sarcinii q aduse de la infinit în punctul A, împărţit la q'.

Notă: Potenţialul V_A nu poate fi măsurat (căci nu putem ajunge la infinit!), dar diferenţa de potenţial V_A-V_B poate fi măsurată. Aceasta se numeşte **tensiunea electrică** pe care sarcina q o creează (≡generează) între punctele A şi B.

Dacă avem mai multe sarcini electrice q_1, q_2,..., fiecare determină câte un câmp electrostatic şi câte un potenţial, care se însumează.

Suprafeţe echipotenţiale

Fie q o sarcină punctuală fixată. Am definit potenţialul scalar al sarcinii q, într-un punct M, prin $V_M = \varepsilon \frac{q}{\left\| q\overrightarrow{M} \right\|}$.

Mulţimea punctelor din spaţiu care au acelaşi potenţial formează o **suprafaţă echipotenţială** a câmpului. Pentru orice scalar k, se poate considera suprafaţa $\{M \mid V_M = k\}$ care va fi o sferă centrată în q. Liniile de câmp ale câmpului electrostatic $\vec{E}_q$ sunt semidrepte având capătul în q, ortogonale pe suprafeţele echipotenţiale (figura 3.7).

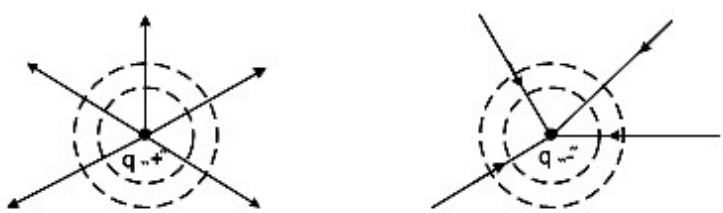


Fig. 3.7

În cazul când q_1 „+” şi q_2 „–” sunt două sarcini punctuale, atunci potenţialul lor va fi câmpul scalar V care în fiecare punct M din spaţiu are valoarea $V_M = \varepsilon \frac{q_1}{\left\|q_1 \overrightarrow{M}\right\|} + \varepsilon \frac{q_2}{\left\|q_2 \overrightarrow{M}\right\|}$.

Se poate arăta în acest caz că liniile de câmp arată ca în figura 3.8 (ies din sarcina „+” şi intră în sarcina „–”), iar suprafeţele echipotenţiale (duse punctat) sunt ortogonale liniilor de câmp.

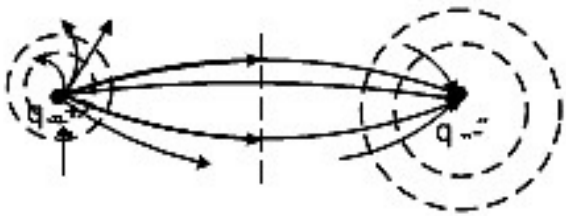


Fig. 3.8

<u>Notă:</u> Nu am precizat până acum unităţile de măsură. Am arătat că forţa coulombiană de interacţie între două sarcini electrice q, q' are mărimea $F = \pm 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{qq'}{r^2}$ N (semnul alegându-se astfel încât F>0). Mărimea $9 \cdot 10^9 \cdot \frac{|q|}{r^2}$ se numeşte **intensitatea câmpului electrostatic** al sarcinii q la distanţa r şi se măsoară în $\frac{\mathrm{m}^2\mathrm{N}}{\mathrm{C}^2} \cdot \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$. Apoi lucrul forţei coulumbiene F se măsoară în $N \cdot m$=J şi potenţialul câmpului se măsoară, conform (3), în $\frac{\mathrm{m}^2\mathrm{N}}{\mathrm{C}^2} \cdot \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}} = \mathrm{m}\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}$. Vom vedea că 1 $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}$=1 V

(volt), deci diferenţele de potenţial între orice două puncte se măsoară în volţi.

§ 2. CURENTUL ELECTRIC

2.1. Intensitatea curentului electric

Definiţie: **Curentul electric** este mişcarea ordonată de sarcini electrice libere, care circulă printr-un **conductor** (de exemplu, sârmă metalică sau cablu) dacă există o diferenţă de potenţial (≡voltaj) între capetele conductorului.

În metale, purtătorii de sarcină sunt electronii, deci particule încărcate negativ, cu sarcina de mărime *e*. Circulaţia curentului electric este similară cu căderea gravitaţională a unei ape de la înălţime sau cu fluxul de apă al unui râu. Iar diferenţa de potenţial este diferenţa între nivelurile apei; dacă nu există diferenţă de potenţial, nu există curent. Sarcinile electrice se concentrează la suprafaţa conductorului (figura 3.9).

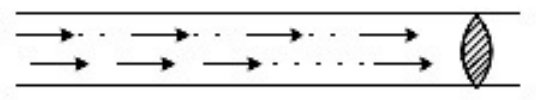


Fig. 3.9

Printr-o convenţie impusă de fizicieni, încă din vremuri de confuzie, deplasarea se face în sensul mişcării sarcinilor pozitive, sub influenţa unui câmp electric aplicat. Aşadar, sensul curentului electric ar fi cel în care sarcinile electrice se

deplasează de la „+” la „–”, iar convenţiile sunt dificil de schimbat …

Raţional ar fi fost să acceptăm mişcarea electronilor de la polul „–” la polul „+” al sursei de curent, adică în sensul scăderii potenţialului electric! Viteza de deplasare a electronilor în metale este redusă, de circa 10^{-4} m/s, datorită ciocnirii de particulele reţelei cristaline a metalelor. Vom studia mai întâi **curentul continuu** (numit constant sau direct), unde aceeaşi cantitate de electricitate, exprimată în număr de sarcini, trece fără să-şi schimbe sensul prin secţiunea transversală a unui conductor, în aceleaşi intervale de timp. Mai târziu, vom studia **curentul alternativ**, care îşi schimbă periodic sensul.

Definiţie: **Cantitatea de electricitate** (**sarcina totală**) este:

$$Q = N \cdot e, \qquad (5)$$

unde N este numărul de purtători de sarcini (≡electroni liberi în solide sau ioni în gaze sau lichide).

Exemplu: Câţi electroni sunt concentraţi într-o sarcină electrică $q=10^{-7}$ C?

Răspuns: $10^{-7}= N \cdot e$,

deci $N = 10^{-7} / 1{,}6 \times 10^{-19} \cong 62 \times 10^{10}$ electroni.

Definiţie: **Intensitatea medie** a curentului electric (pe scurt, **curentul**) este cantitatea de electricitate ΔQ transmisă în timpul Δt:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \qquad (6)$$

Intensitatea este măsurată în **amperi**. Aşadar, 1A=1C/s; deci 1A este intensitatea curentului care transportă printr-o secţiune transversală o sarcină de 1C într-o secundă.

Intensitatea instantanee, la momentul t, este $I(t) = Q'(t)$, derivata cantităţii de electricitate. Într-un interval de timp [t_1, t_2], rezultă $Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t)dt$.

Exemple:

1) Un curent electric cu I=0,5A transportă în 20s cantitatea de electricitate de $\Delta Q = I \cdot \Delta t = 0,5 \times 20 = 10\,\text{C}$.

2) O celulă electrochimică este formată din doi electrozi de argint plasaţi într-o soluţie apoasă de nitrat de argint. Timp de 1 oră, prin celulă trece un curent continuu de 0,8 A. Care este sarcina totală transportată şi câţi electroni conţine?
Soluţie: Conform (6) $\Delta Q = I \cdot \Delta t = 0,8C/s \times 3600s = 2880\,\text{C}$;

apoi conform (5) $N = \frac{\Delta Q}{e} = \frac{2880}{1,6 \times 10^{-19}} \cong 18 \times 10^{21}$. Acesta este

numărul de ioni de argint care vor fi depuşi pe electrozi.
Notă: Menţionăm că 1mA=10^{-3}A şi că 1 amper-oră =1 Ah= =3600 C.

Într-un circuit integrat, $I \cong 10^{-6}$ A=1μA; la becurile de acasă, I este între 0,1 şi 0,4A, printr-un motoraş electric trec 0,1A şi prin rezistenţa unei maşini de spălat trece un curent de circa 10A.

Atenţie! un curent sub 1 mA este inofensiv, dar unul de peste 0,1 A este nociv sau chiar letal.

2.2. Reţea electrică, elemente de circuit

Definiţie: O **reţea electrică** (≡**circuit electric**) este un graf, având pe muchii conductori (care permit mişcarea electronilor liberi) şi în vârfuri, diverse elemente de circuit – generatoare de tensiune (surse de curent), rezistori (care pot fi obiecte metalice, dispozitive), ampermetre, voltmetre, comutatoare ON/OFF, etc.

Pentru a obţine curent electric printr-un conductor trebuie menţinută o diferenţă de potenţial (≡tensiune electrică) la capetele conductorului. Această diferenţă de potenţial este asigurată prin generatori (surse de curent); de exemplu, o baterie sau un acumulator. Dacă un conductor este rupt sau dacă se include în circuit un izolator, atunci nu circulă curent.

Terminalele unui generator se numesc poli; polul cu potenţialul mai mare este numit pozitiv („+”) şi celălalt – negativ („–”). La polul „-” există un surplus de electroni şi la „+”, un deficit de electroni. În reţelele externe, electronii se deplasează de la „-” la „+”, dar s-a convenit să se considere că în reţele externe, curentul curge de la „+” la „-”.

Forţa electromotoare (f.e.m.) a unui generator, măsurată în V, este egală cu diferenţa de potenţial la capetele generatorului. Indicăm câteva tensiuni electrice (≡voltaje) practice: la polii unei baterii 1-2 V, la un acumulator cu plumb – 2 V, reţeaua casnică – 220 V, reţeaua electrică a unui automobil

6-12 V, tramvai – 550 V, linie de înaltă tensiune – 500.000 V.

Diferenţa de potenţial între nori ajunge în timpul unui uragan la zeci de milioane de volţi. Voltajul de 12 V nu este dăunător, dar devine nociv sau chiar letal la peste 40 V.

Orice segment din circuit, conectat la restul circuitului prin două borne, este numit **dipol**. Dipolii sunt activi dacă segmentul respectiv conţine un generator electric sau pasivi, altminteri. Prin convenţie, circuitele electrice arată simbolic modul de conectare a elementelor de circuit, care au diverse reprezentări, de tipul:

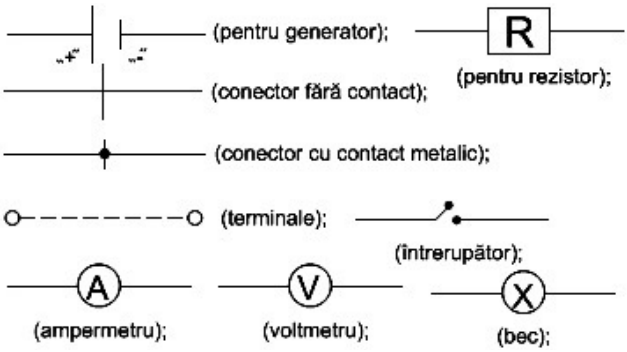


Fig. 3.10

Ampermetrul A măsoară intensitatea, fiind legat în serie cu conductorul al cărui curent se măsoară, ca în figura 3.10.

Voltmetrul V măsoară tensiunea dintre bornele unui element de circuit; el trebuie conectat în paralel cu dipolul respectiv, ca în figura 3.11, a); dacă avem un circuit care include un ampermetru A, un bec şi un voltmetru V, ca în figura 3.11, c), V arată voltajul la terminalele becului.

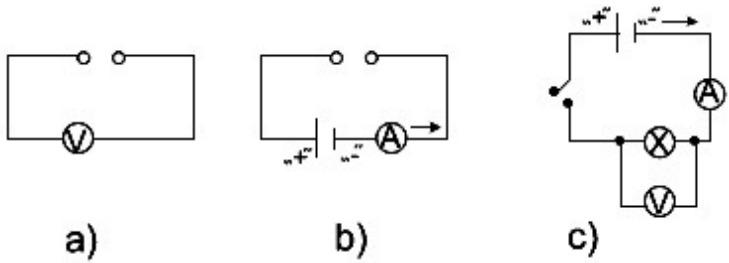


Fig. 3.11

2.3. Rezistenţa electrică, legea lui Ohm

Rezistenţa unei secţiuni de conductă, la curgerea unui fluid, se măsoară prin câtul dintre diferenţa de presiune şi debit. În mod similar, rezistenţa unui conductor (sau receptor) la trecerea unui curent electric este câtul V/I dintre **diferenţa de potenţial** V, numită şi cădere de tensiune între extremităţile conductorului, şi intensitatea I a curentului. Electronii dintr-un conductor se ciocnesc cu ionii reţelei cristaline a conductorului metalic, astfel încât energia lor este convertită în energia internă a conductorului.

Presupunem, de exemplu, că pentru un fir conductor de cupru, care prezintă între extremităţi o diferenţă de potenţial ajustabilă, s-au constatat următoarele valori pentru I şi V, dispuse într-un tabel ca în figura 3.12:

I	0	10	20	30	A
V	0	1	2	3	V

Fig. 3.12

Se observă că rapoartele $\frac{1}{10}, \frac{2}{20}, \frac{3}{30}, \ldots$ sunt egale, ceea ce sugerează că raportul $\frac{V}{I}$ este constant. Repetând experimentul pentru fir de oţel, aluminiu, etc. s-a constatat că raportul $R=\frac{V}{I}$ este constant (constanta diferind de la un material la altul). Germanul G.S. Ohm a stabilit astfel:

LEGEA LUI OHM (a conducţiei electrice): „Căderea de tensiune V pe o porţiune de circuit este direct proporţională cu intensitatea I a curentului electric prin acea porţiune şi, ca atare, raportul

$R=\frac{V}{I}$ este constant (numit **rezistenţa** porţiunii)". (7)

În planul V–I, ecuaţia $V = R \cdot I$ (cu R constant) este ecuaţia unei linii drepte trecând prin origine; de aceea, se spune că tensiunea V creşte liniar cu intensitatea. Dar în cazul tranzistorului sau microprocesoarelor, relaţia $V = f(I)$ nu mai este exprimată printr-o funcţie reală de gradul întâi.

Rezistenţa electrică se măsoară în **ohmi**, [Ω]. 1 Ω este rezistenţa unui conductor prin care trece un curent de 1A atunci când căderea de tensiune de la capetele sale este de 1V. Mărimea $1/R$ se numeşte **conductanţă**.

Aşadar, pe un segment de reţea ca în figura 3.13, legea lui Ohm este: V_A-V_B=RI. Această relaţie are loc şi pentru segmente – dipoli pasivi (adică fără generator).

Energia E_g furnizată de generator (măsurată în J) pe un segment de reţea are o parte E_i datorată porţiunii interne a

generatorului şi alta, E_e, datorată porţiunii externe; aşadar, $E_g=E_i+E_e$.

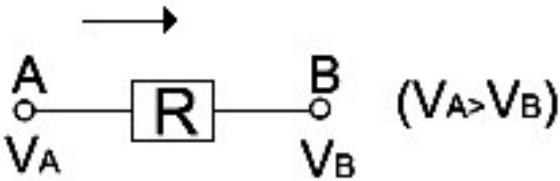


Fig. 3.13

Notând cu q sarcina electrică totală prin segmentul considerat, raportul $\mathbf{E}=\frac{E_g}{q}$ este **tensiunea electromotoare** (t.e.m. sau forţa electromotoare); apoi $U=\frac{E_e}{q}$ este numită **tensiunea de la borne** şi $u=\frac{E_i}{q}$ **tensiunea interioară**. Aşadar,

$$\mathbf{E}=U+u \qquad (8)$$

Pentru o reţea închisă simplă, cu un rezistor (având rezistenţa R) şi un generator (cu rezistenţa interioară r), ca în figura 3.14, avem $U=R\cdot I, u=r\cdot I$, deci $\mathbf{E}=(R+r)\cdot I$, de unde rezultă:

$$I=\frac{1}{R+r}\cdot\mathbf{E} \qquad (9)$$

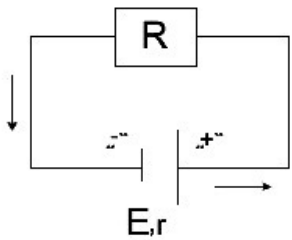


Fig. 3.14

Dacă $R\neq 0$, se spune că **circuitul funcţionează în sarcină**. Tensiunea la borne este $U=R\cdot I=R\frac{1}{R+r}\mathbf{E}$ şi

tensiunea interioară $u = r \cdot I = r\frac{1}{R+r}\mathbf{E}$; în acest caz graficul dependenţei $U=U(R)$ arată ca în figura 3.15.

Dacă R=0, se spune că avem un **scurtcircuit**; în acest caz, U=0 şi conform (9), $I_{sc} = \frac{1}{r}\mathbf{E}$.

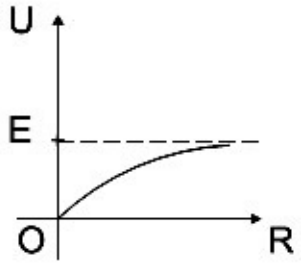


Fig. 3.15

La scurtcircuit, curentul I poate depăşi un anumit prag, conductorii se supraîncălzesc şi se aprinde izolaţia lor, cu pericol de incendiu. În practică, se folosesc siguranţe automate care evită efectele unor scurtcircuite.

Pentru **E** dat, din (9) rezultă $U+rI=\mathbf{E}$, deci $U=\mathbf{E}-rI$ şi graficul dependenţei $U=U(I)$ este indicat în figura 3.16.

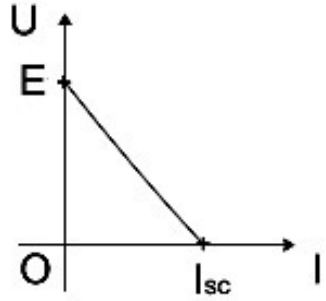


Fig. 3.16

În fine, dacă r=0, atunci se spune că **funcţionarea este în gol;** în acest caz, între bornele sursei de tensiune nu este conectat niciun circuit.

Exemple: 1) Un circuit simplu este compus dintr-un rezistor cu R=14 Ω şi un generator cu f.e.m. **E**=3 V şi r=1 Ω. Să se determine: a) intensitatea curentului prin circuit; b) tensiunea la borne şi căderea de tensiune în circuit; c) sarcina electrică ce trece prin generator în timp de 2 minute.

Soluţie: a) Aplicăm formula (9): $I = \frac{3}{14+1} = 0,2A$;

b) $U = R \cdot I = 11 \times 0,2 = 2,2A$; căderea de tensiune este $\mathbf{E} - R \cdot I = r \cdot I = 0,2V$; c) $\Delta Q = I \cdot \Delta t = 0,2 \times 120 = 24C$.

2) Un generator electric are rezistenţa internă r=0,2 Ω şi alimentează un rezistor cu rezistenţa R=11,8 Ω, producând un curent cu I=1,2 A. Ce intensitate va avea curentul prin generator la scurtcircuit?

Răspuns:

$\mathbf{E} = I(R+r) = 1,2 \times (11,8+0,2) = 14,4V$; $I_{sc} = \mathbf{E}\frac{1}{r} = \frac{14,4}{0,2} = 72A$.

3) La funcţionarea în gol a unei surse (generator), tensiunea la borne este U=10 V şi la funcţionarea în scurtcircuit, I_{sc}=20 A. Să se determine rezistenţa internă a sursei.

Soluţie: **E**=10 V şi $r = \mathbf{E}\frac{1}{I_{sc}} = \frac{10}{20} = 0,5\Omega$.

2.4. Rezistivitate

Rezistenţa R a unui conductor (sârmă, cablu) depinde de mărimea acestuia. Ea depinde de lungimea l a conductorului şi de aria secţiunii transversale S, dar şi de materialul din care este realizat conductorul. S-a demonstrat formula următoare, confirmată experimental:

$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{10}$$

unde coeficientul ρ este numit **rezistivitatea** conductorului.

În sistemul SI, rezistivitatea se măsoară în Ωm. Prin convenţie, în Ingineria electrică, l se măsoară în m şi aria S a secţiunii transversale este în mm^2, deci ρ se măsoară în $\Omega \cdot \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$.

Rezistivitatea depinde numai de material şi creşte cu temperatura; anume la temperatura t, rezistivitatea ρ_t satisface relaţia

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t) \tag{11}$$

unde ρ_0 este rezistivitatea la 0°C şi α un coeficient (ambele se găsesc în tabele specializate).

Notă: Pentru anumite metale, la temperaturi foarte joase (spre 0 K$\cong$ -273°C), rezistivitatea şi implicit rezistenţa tind spre zero. Se spune atunci că are loc fenomenul de **superconductibilitate**.

Indicăm câteva materiale conductoare, cu rezistivităţile lor în Ωm (la temperatura ambiantă de 20°C): pentru cupru, ρ_0

$=1,72\times10^{-8}$, pentru aluminiu, $\rho_0=2,63\times10^{-8}\,\Omega$m, pentru argint, $\rho_0=1,47\times10^{-8}\,\Omega$m, şi la fier, $\rho_0=10\times10^{-8}\,\Omega$m.

În practică, formula (10) se foloseşte la proiectarea diverselor încălzitoare electrice. Cele mai bune conductoare de electricitate sunt Ag şi Cu.

Exemplu: Să se determine rezistenţa electrică la 20°C a unei sârme de aluminiu de 50 m lungime şi cu diametrul secţiunii circulare de $2\cdot10^{-3}$ m.

Răspuns: Din tabelă, $\rho_0=2,63\times10^{-8}$ Ωm şi aplicând formula (10), $R=\dfrac{2,63\times10^{-8}\times50}{\pi\cdot(10^{-3})^2}\cong0,42\Omega$.

Notă: Uneori este necesar să modificăm I ; de exemplu, la un receptor radio sau difuzor, pentru a schimba volumul sunetului. Pentru modificarea lui I, se utilizează rezistenţe variabile numite potenţiometre sau reostate, unde printr-un cursor se modifică lungimea unor conductori, deci rezistenţa.

2.5. Condensatoare

O problemă importantă a Electrostaticii este posibilitatea acumulării de sarcini electrice, care să poată fi utilizate ulterior.

Dacă avem doi conductori, iniţial neutri electric şi dacă se extrage o cantitate de sarcini de pe unul, mutându-le pe celălalt, se creează o diferenţă de potenţial. Cantitatea de electricitate q pe care un corp o poate înmagazina pentru o diferenţă de potenţial U este proporţională cu q şi invers proporţională cu U.

Definiţie: Un sistem din doi conductori vecini, numiţi **armături**, separaţi de un mediu izolator (vid sau un dielectric), se numeşte **condensator electric** (≡**capacitor**).

Liniile de câmp „ies” de la un conductor şi „intră” în celălalt, ca în figura 3.17. Cele mai des întâlnite sunt condensatoarele plane, unde conductorii (≡armăturile) sunt plăci plane încărcate. Dacă armăturile sunt legate la bornele unui generator electric (de exemplu, o baterie), atunci condensatorul se încarcă cu sarcini $+q$ şi $-q$.

Definiţie: **Capacitatea electrică** C a unui condensator este:

$$C = \frac{q}{U}, \qquad (12)$$

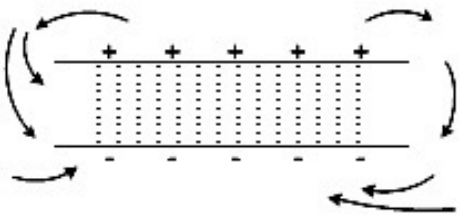


Fig. 3.17

unde q este sarcina de pe una din armături şi U este diferenţa de potenţial între armături.

Capacitatea este proprietatea de a acumula sarcini electrice; ea se măsoară în **farazi** [F], în onoarea lui M. Faraday. 1 F este capacitatea unui condensator având pe una din armături 1 C şi diferenţa de potenţial între armături de 1 V.

Notă: Cel mai simplu condensator este cel format din două lamele paralele (figura 3.18).

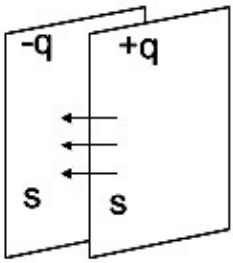


Fig. 3.18

Lamelele (≡armăturile) au aria S şi distanţa dintre ele este l. Se arată că are loc formula: $C = k\frac{S}{l}$, unde k este un parametru depinzând de mediul dintre armături.

S-au construit, de asemenea, condensatoare cilindrice sau sferice. Se găsesc condensatoare şi în natură; de exemplu, membranele unor celule separă straturile fine de particule încărcate, din interiorul şi exteriorul celulelor.

Se poate arăta că dacă C_1, C_2 sunt capacităţile a două condensatoare legate în paralel (respectiv în serie), atunci capacitatea sistemului întreg este $C=C_1+C_2$ (respectiv verifică relaţia $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$).

Condensatoarele sunt folosite în diverse dispozitive electronice, ca şi în circuitele de semnalizare ale automobilelor sau de demarare ale motoarelor electrice de curent alternativ.

<u>Exemple:</u> 1) Dacă pentru un condensator plan avem S=1m^2, l=0,02mm, atunci capacitatea sa electrică este $C = k\frac{1}{2\times10^{-5}} = 5k\times10^4$ F. Dacă mediul dintre armături este aer

uscat (la 20°C şi presiune atmosferică), atunci $k \cong 9 \times 10^{-12}$ F/m; iar pentru hârtie, $k \cong 30 \times 10^{-12}$ F/m.

2) Să considerăm reţeaua electrică din figura 3.19. Să se determine sarcina q de pe plăcile condensatorului, cunoscând f.e.m. **E** a generatorului de curent şi rezistenţa lui internă, r.

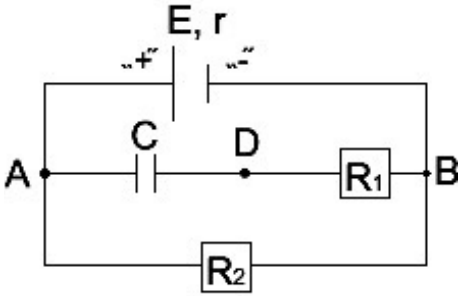


Fig. 3.19

<u>Soluţie:</u> Prin ramura cu condensator nu trece curent electric. Dar prin celelalte ramuri trece. Aşadar, curentul nu trece prin rezistenţa R_1, dar trece prin rezistanţa R_2 şi acesta are intensitatea $I = \frac{1}{R+r}\mathbf{E}$, conform formulei (9). Atunci diferenţa de potenţial dintre bornele A şi B este tocmai căderea de tensiune pe rezistenţa R_2 deci $V_A - V_B = I \cdot R_2 = \frac{R_2}{R_2 + r}\mathbf{E}$.

Sarcina pe condensator va fi $q=CU$, unde U este diferenţa de potenţial dintre plăcile condensatorului, iar C este capacitatea electrică a condensatorului. Dar prin rezistenţa R_1 nu circulă curent, deci toate punctele ei au acelaşi potenţial şi, ca atare, $q = C\frac{R_2}{R_2 + r}\mathbf{E}$.

§3. EFECTUL TERMIC ŞI EFECTUL CHIMIC AL CURENTULUI ELECTRIC

Curentul electric îşi manifestă efectele doar atunci când el parcurge un circuit închis. Vom studia câteva din binefacerile utilizării curentului electric şi ale energiei electrice, obţinute prin aplicarea diverselor lor efecte – termice, mecanice, chimice sau magnetice. De exemplu, un motor electric converteşte energia electrică în energie mecanică; în celulele galvanice, energia chimică este convertită în energie electrică, iar efectul fotoelectric transformă energia luminii tot în energie electrică etc.

Electronii care se deplasează într-un conductor metalic, ca şi ionii dintr-o soluţie electrolitică, nu se văd şi totuşi …, dacă legăm o sârmă de fier (nichelină sau wolfram) la polii unei surse de curent electric, sârma se încălzeşte, putând deveni chiar incandescentă (precum filamentul de wolfram la becuri); similar, un lichid devenit conductor se încălzeşte. Să vedem de ce.

3.1. Efectul termic, legea lui Joule

Considerăm un circuit electric. Energia E_g furnizată de un generator determină tensiunea electromotoare $\mathbf{E} = \frac{E_g}{q}$, unde q este sarcina electrică totală prin circuit. Conform (8), $\mathbf{E} = U + u$, unde U este tensiunea la borne şi u tensiunea interioară. Energia consumată în circuitul exterior este $\Delta E_e = U \cdot \Delta q$; deoarece $\Delta q = I \cdot \Delta t$ (conform (6)), rezultă că

$\Delta E_e = U \cdot I \cdot \Delta t$. Energia $\Delta E_i = u \cdot \Delta q$ este consumată în interiorul sursei.

Dacă receptorul este un rezistor cu rezistenţa R, atunci energia electrică primită de acesta se transformă în lucru sau echivalent, în căldură $\mathfrak{L} = \Delta Q = \Delta E_e$. Am obţinut astfel:

LEGEA LUI JOULE (a efectului termic al curentului electric): „Într-un element de circuit având o diferenţă de potenţial U între borne, parcurs de un curent electric cu intensitatea I pe o durată de timp Δt , curentul efectuează lucrul

$$\mathfrak{L} = U \cdot I \cdot \Delta t \text{ (măsurat în [J]).”} \qquad (13)$$

Folosind legea lui Ohm ($U=RI$), rezultă totodată $\Delta Q = U\dfrac{U}{R}\Delta t = \dfrac{U^2}{R}\Delta t$, deci $\Delta Q = \dfrac{(RI)^2}{R}\Delta t = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$.

Reţinem că lucrul efectuat de câmpul coulombian pentru deplasarea unei sarcini electrice q pe durata Δt, între două puncte între care există o diferenţă de potenţial U este $\mathfrak{L} = q \cdot U = U \cdot I \cdot \Delta t$.

Exemplu: Dacă I=2A, R=5Ω şi Δt=10 minute, atunci rezistorul primeşte căldura ΔQ=5×4×60=1200 J.

Notă: Există o multitudine de aplicaţii directe ale legii lui Joule, casnice sau industriale, precum: reşoul, plita electrică, aerotermele, uscătoarele de păr, prăjitoarele de pâine etc.

Randamentul circuitului considerat este $\eta = \frac{\Delta E_e}{\Delta E_g} = \frac{U \cdot \Delta q}{\mathbf{E} \cdot \Delta q} = \frac{U}{\mathbf{E}}$, deci aplicând legea lui Ohm, $\eta = \frac{R \cdot I}{E}$ şi în final, conform (9), $\eta = \frac{R \cdot I}{I(R+r)}$, adică

$$\eta = \frac{R}{R+r} \tag{14}$$

Aplicaţie: Determinăm energia E stocată într-un condensator plan. Conform (13) avem $\Delta E = U \cdot \Delta q$ şi conform (12), $U = \frac{q}{C}$, deci $\Delta E = \frac{q}{C} \cdot \Delta q$, de unde $E'(q) = \frac{q}{C}$ şi $E(q) = \frac{1}{C} \cdot \frac{q^2}{2} = \frac{1}{2C}(U \cdot C)^2 = \frac{1}{2}CU^2$.

Exemplu: 1cm^2 de membrană are capacitatea C=6×10^{-7}F. Dacă diferenţa de potenţial între feţele membranei este 0,1V, să se determine energia electrică stocată în acea membrană.

Răspuns: $E = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}(6 \times 10^{-7})(0,1)^2 \cong 3 \times 10^{-9} J$.

3.2. Puterea curentului electric

Definiţie: **Puterea consumată** în circuitul exterior este:

$$P = \frac{\Delta E_e}{\Delta t} = \frac{\mathfrak{L}}{\Delta t} \overset{cf.(13)}{=} U \cdot I \tag{15}$$

Aşadar, folosind legea lui Ohm:

$$P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} \tag{16}$$

Puterea este măsurată în W (**watt**); 1W=1V×1A, deci 1W este puterea circuitului prin care trece un curent de 1A, pentru o diferenţă de potenţial de 1V.

Puterea disipată în interiorul generatorului este $P_{\text{int}} = u \cdot I = I^2 \cdot r$, unde r este rezistenţa internă a generatorului.

Notă: Reamintim aici următoarele transformări de unităţi de măsură, folosite în mod curent în Energetică:

1 calorie este energia necesară pentru a încălzi 1g apă (deci 1 cm^3) cu 1 K (de la 14,5 la 15,5^{O}C);

Joule a arătat că 1 cal≅4,19 J („echivalentul mecanic al caloriei"). În sistemul SI nu se utilizează "caloriile".

Aşadar, 1kcal≅4,19kJ şi 1Gcal≅4,19GJ. Invers, cum $\frac{1}{4,19} \cong 0,239$, rezultă 1J≅0,239 cal, 1kJ≅0,239 kcal.

Pe de altă parte, 1kWh=10^3Wh=3,6×10^6Ws=3,6×10^6J; sau 1kWh≅0,86×10^6cal, deci 1MWh≅0,86Gcal.

Invers, 1 Gcal≅1,16MWh=1160kWh şi, în fine, 1kWh≅ $\frac{10^9}{1160}$cal=$\frac{10^6}{1160}$kcal, deci 1kWh≅860kcal.

În general, **tensiunea nominală** a unui aparat electric este tensiunea la care el funcţionează normal.

De exemplu, un bec funcţionează la 220 V şi are puterea 25…100W; un frigider are tensiunea nominală de 220V şi puterea 50…300 W; un aspirator 230V şi puterea 500W; un fier de călcat 230V şi puterea 800W, iar o maşină de spălat 230V şi puterea 2…3kW.

Exemple: 1) Rezistenţa unui bec de 60W, la o tensiune de 220V, este conform (16), $R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{60} \cong 807\Omega$.

2) Pentru a confecţiona rezistenţa unei plite electrice cu puterea P=600W care funcţionează la tensiunea nominală U=220V, se foloseşte o sârmă crom/nichel cu diametrul d=0,75mm. Care este lungimea sârmei necesare?

Răspuns: $R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{600} \cong 80,7\Omega$. Apoi, conform (10), $R = \rho\frac{l}{S} = \rho\frac{4l}{\pi d^2}$, de unde $l = \frac{\pi d^2 R}{4\rho} = \frac{\pi \cdot 0,75^2 \cdot 80,7}{4\rho}$, iar ρ se ia din tabelă.

3) Două becuri de 60W şi 100W sunt legate în serie la o tensiune de 120V. Să se determine intensitatea curentului în circuit.

Soluţie: Becurile sunt receptori/rezistenţe cu $R_1 = \frac{120^2}{60} = 240\Omega$, $R_2 = \frac{120^2}{100} = 144\Omega$. În legarea în serie, rezistenţele se adună deci $R=R_1+R_2$=384 Ω şi intensitatea curentului prin circuit este $I = \frac{120}{384} \cong 0,31A$.

4) Se încălzeşte 1kg apă de la 20°C la 100°C cu ajutorul unui reşou electric de 800W. Presupunând că întreaga energie electrică se transformă în căldură, cât timp este necesar pentru încălzirea menţionată şi care este preţul încălzirii la un cost de c lei/kWh?

Soluţie: Conform formulei (13) din Capitolul 2.§3, căldura necesară încălzirii este $Q = mc\Delta t$ (Δt=variaţia de temperatură), deci $Q = 1 \cdot 4180 \cdot (100 - 20) = 334400$ J.

Pe de altă parte, Q=$P\,\Delta t$ (Δt=variaţia de timp!), deci $\Delta t = \dfrac{Q}{P} = \dfrac{334400}{800} \cong 418\,s \cong 7\,\text{min}.$

Apoi, $334400\text{J} = \dfrac{334400}{3{,}6 \times 10^6} \cong 0{,}09\,\text{kWh}.$

Preţul cerut va fi $0{,}09 \times$ c lei.

5) Un circuit electric este format dintr-o baterie cu f.e.m **E**=6V (cu rezistenţa internă r=0,7Ω) şi un rezistor cu R=1,3Ω. Prin circuit trece un curent electric timp de 15 minute. a) Care este energia consumată de rezistor? b) Ce energie electrică produce bateria? c) Câtă apă se poate încălzi cu 20K dacă s-ar furniza rezistorului integral energia consumată în interiorul bateriei? d) Ce randament se obţine?

Soluţie:

a) $I = \dfrac{1}{R+r} \cdot \mathbf{E} = = \dfrac{6}{1{,}3+0{,}7} = 3\,\text{A}$ şi

$E_e = I^2 \cdot R \cdot \Delta t = 9 \times 1{,}3 \times 15 \times 60 = 10530$ J.

b) E_g=$\mathbf{E} \cdot I \cdot \Delta t = 6 \times 3 \times 15 \times 60 = 16200$ J.

c) Energia porţiunii interne este $E_i = 16200 - 10530 = 5670$ J şi căldura necesară este $Q = mc\Delta t = m \cdot 4180 \cdot 20 = 83600 \cdot m$; dar Q=E_i şi rezultă m≅68 g. d) $\eta = \dfrac{E_e}{E_g} = \dfrac{10530}{16200} = 0{,}65 \equiv 65\%$.

6) Considerăm un rezistor cu rezistenţa x necunoscută, conectat la bornele unui generator cu f.e.m. **E** şi rezistenţa internă *(R)* Pentru ce x, puterea transferată în exterior este maximă?

Soluţie: Puterea transferată (≡utilă) este $U \cdot I = I^2 \cdot x$. Dar $I = \frac{1}{x+r} \cdot \mathbf{E}$, deci puterea este $\frac{x}{(x+r)^2} \cdot \mathbf{E}^2$. Maximul expresiei $y = \frac{x}{(x+r)^2}$ este atins pentru $x=r$ [avem $yx^2 + (2ry-1)x + yr^2 = 0$ şi punem condiția ca discriminantul să fie mai mare ca zero, deci $(2ry-1)^2 - 4y^2r^2 \geq 0$, iar max $y = \frac{1}{4r}$ şi rezultă $x=r$; de asemenea, se putea pune condiţia $y'(x)=0$].

3.3. Elemente de Electrochimie

Electrochimia este un domeniu interdisciplinar, aşa cum arată şi denumirea, care studiază efectul chimic al curentului electric şi în particular, electroliza, galvanometria (acoperirile metalice), acumulatorii electrici, bateriile, lupta cu coroziunea etc. Electroliza se ocupă cu reacţiile chimice care au loc în diverse soluţii la trecerea unui curent electric, implicând transferul de electroni între electrozi şi electrolit. Precizăm acum termenii.

Lichidele nu conduc, de regulă, curent electric deoarece nu au purtători liberi de sarcini electrice. Dar substanţele pot genera **soluţii,** în apă sau în alte lichide, numite **electroliţi** şi acestea pot conduce curent electric. Printre electroliţi menţionăm unele săruri topite, baze sau acizi.

Molecule de apă pot să „rupă” moleculele solvatului (substanţei dizolvate) în particule încărcate electric, numite **ioni** („ion”≡mers, în greceşte); ionii pot fi pozitivi (≡**cationi**) sau negativi (≡**anioni**). Procesul de descompunere a moleculelor solvatului în ioni se numeşte **disociere electrolitică**.

Există şi un proces invers, în cazul temperaturii constante.

Dacă temperatura apei creşte, atunci creşte numărul de ioni şi, în acelaşi timp, creşte posibilitatea unor ciocniri. Anionii sunt atraşi spre anod, iar cationii spre catod.

Schema este redată în figura 3.20.

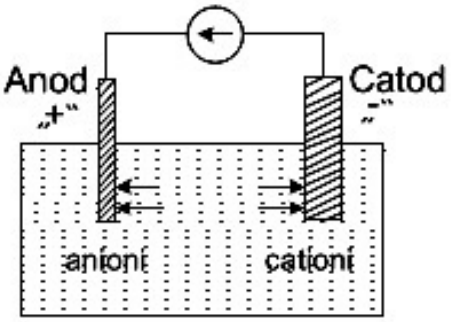


Fig. 3.20

Întregul proces se numeşte **electroliză**. Anodul şi catodul se numesc **electrozi** şi aceştia sunt conectaţi la polii unei surse de f.e.m. (de exemplu, un acumulator).

Efectul chimic al electrolizei a fost descoperit de Faraday, care a arătat că masa de substanţă depusă pe un electrod, în cadrul procesului, este proporţională cu cantitatea de electricitate trecută prin electrolit.

LEGEA LUI FARADAY (a electrolizei): „Are loc relaţia:

$$M = k \cdot q \qquad (17)$$

unde M este masa de substanţă depusă, q este cantitatea de electricitate trecută prin electrolit şi k este o constantă numeric egală cu masa de substanţă depusă pentru 1 C.”

Notă: Electroliza este utilizată în Electrochimie, la rafinare, galvanizare; de asemenea, disocierea apei ($H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$) permite obţinerea de hidrogen.

O problemă de actualitate este cea a stocării şi conversiei energiei; energetica electrochimică studiază pilele de combustie, acumulatorii şi bateriile. O contribuţie deosebită la studierea acestor probleme a avut-o profesorul N. Vasilescu–Karpen, fost rector al Politehnicii bucureştene.

Acumulatori

Diferenţa de potenţial dintre un electrod imersat şi un electrolit formează **potenţialul electrochimic al electrodului.** Dacă doi electrozi sunt imersaţi într-un electrolit, atunci se spune că avem o **celulă galvanică**; în acest caz, apare o diferenţă de potenţial electric între ei, tocmai diferenţa potenţialelor electrochimice ale electrozilor. Legarea la un conductor duce la formarea curentului electric ce poate fi utilizat ca sursă generatoare.

Exemplu: Plăcile de Cu şi Zn imersate într-o soluţie de acid sulfuric formează celebra celulă Volta.

Acumulatorii electrici sunt celule galvanice în care electrozii permit refacerea proprietăţilor iniţiale, după ce un curent de încărcare este trecut în sens invers faţă de curentul de descărcare. Capacitatea unui acumulator este cantitatea de electricitate obţinută, în funcţie de temperatură, curentul de descărcare şi tensiunea iniţială. Capacitatea unui acumulator se măsoară în amperi–oră (1 A.h≡3600 C). Întâlnim acumulatori la automobile (ca starteri pentru aprindere), la diverse instrumente plasate pe submarine sau la sateliţi artificiali.

Bateriile electrice sunt sisteme electrochimice de stocare a energiei. La descărcare, energia chimică stocată se transformă în energie electrică. Capacitatea unei baterii este cantitatea de sarcini electrice stocate.

Se cunosc diversele aplicaţii casnice sau industriale, precum şi preocupările actuale privind realizarea de baterii performante sau reciclarea bateriilor.

Pilele de combustie convertesc energia chimică în energie electrică, având combustibilul (≡sursa energetică) la anod şi oxidantul la catod. În timp ce bateriile sunt sisteme închise, pilele de combustie consumă combustibilul de la anod, generând curent electric continuu, de joasă tensiune.

Notă: Trecerea unui curent electric printr-un gaz poate conduce la un proces de **ionizare**, datorită prezenţei de ioni (particule încărcate electric) sau electroni liberi, detaşaţi din moleculele gazului. Potenţialul de ionizare se măsoară în **electroni–volţi.** 1 eV=energia obţinută de un electron care trece

printr-un câmp electric, între două puncte cu diferenţa de 1 V între ele. **Plasma** este starea unei substanţe după ce este supusă unui proces de ionizare extremă. Studiul plasmei reprezintă un domeniu separat al Fizicii moderne.

§4. CALCULUL REZISTENŢELOR ELECTRICE ŞI LEGILE LUI KIRCHHOFF

4.1. Rezistenţe în serie şi în paralel

Am văzut în 2.2 că reţelele (≡circuitele) electrice sunt ansambluri formate din mai multe elemente conectate şi ramificate–generatori, fire conductoare, consumatori (rezistenţe, încălzitoare, diverse instrumente). Posturile de televiziune, centralele telefonice, staţiile de telecomunicaţii etc. utilizează circuite electrice complexe şi este importantă cunoaşterea intensităţilor şi tensiunilor electrice, sau pe scurt a curenţilor şi voltajelor în fiecare punct. Fizicianul german G. Kirchhoff a stabilit pe la mijlocul secolului XIX principiile de bază ale circuitelor de curent continuu:

I. În orice punct al circuitului, curentul care intră este egal cu cel care iese.

Aceasta este o reformulare a principiului conservării sarcinilor electrice. Ca atare, dacă un curent este divizat în doi sau mai mulţi curenţi, nici o sarcină nu este pierdută sau creată.

Apoi, deoarece câmpul eletrostatic este conservativ (cf. 1.3), rezultă că:

II. Suma diferenţelor de potenţial în lungul unui drum închis este nulă.

De exemplu, pe drumul *ABCA* din figura 3.21, avem $V_A - V_B + V_B - V_C + V_C - V_A = 0$, cu notaţii transparente.

Vom folosi aceste reguli, pentru a studia legarea în serie sau în paralel a rezistenţelor. Vom nota cu aceeaşi literă rezistorul şi rezistenţa corespunzătoare. În subparagraful următor, vom formula legile generale ale circuitelor electrice de curent continuu, oricât de complexe.

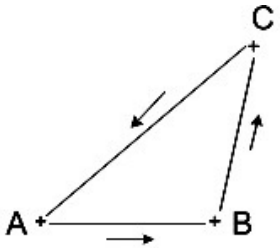


Fig. 3.21

Două sau mai multe rezistenţe (≡rezistoare) sunt legate **în serie**, dacă acelaşi curent le parcurge pe fiecare din ele (figura 3.22,a)). Conform regulii II, avem $\mathbf{E} - IR_1 - IR_2 = 0$ (presupunând rezistența internă a sursei nulă).

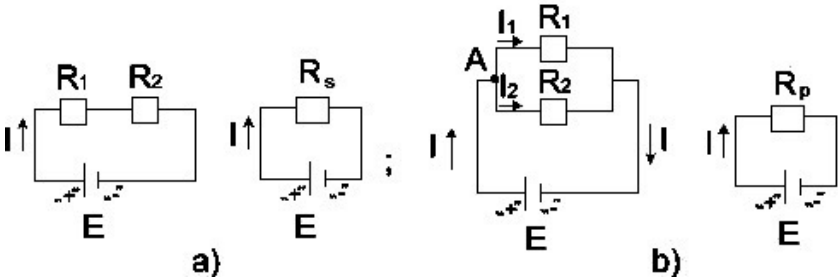


Fig. 3.22

O singură rezistenţă R_s (numită echivalentă) conectată la acelaşi generator produce acelaşi curent *I,* dacă $\mathbf{E} - IR_s = 0$.

Rezultă: $R_s = R_1 + R_2 + \ldots\ldots$ (18)

Aşadar, la legarea în serie, rezistenţele se adună. Dacă dorim reducerea curentului *I*, se adaugă o rezistenţă adiţională.

Două sau mai multe rezistenţe sunt legate **în paralel,** dacă ele au o diferenţă de potenţial comună (figura 3.22,b)).

Conform regulii I, curentul care intră în punctul *A* este egal cu cel care iese, deci $I = I_1 + I_2$. Dar conform legii lui Ohm, $I_1 = \frac{1}{R_1} \cdot \mathbf{E}$ şi $I_2 = \frac{1}{R_2} \cdot \mathbf{E}$, deci $I = (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) \cdot \mathbf{E}$.

O rezistenţă echivalentă R_p va da acelaşi curent dacă $I = \frac{1}{R_p} \cdot \mathbf{E}$. Comparând ultimele două relaţii, rezultă

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots . \qquad (19)$$

[Am pus puncte–puncte, deoarece formulele (18) şi (19) au loc pentru oricâte rezistenţe legate în serie sau în paralel. În aceste formule am neglijat rezistenţele conductorilor din reţea].

Exemple: 1) Dacă avem mai multe becuri legate în serie şi întrerupem unul din ele, circuitul este întrerupt şi nu funcţionează nici celelalte; la legarea în serie, curentul este acelaşi şi voltajele se adună.

La legarea în paralel a unor becuri, dacă un bec este întrerupt, merg celelalte cu acelaşi voltaj. Dacă avem 4

rezistenţe identice cu 20Ω legate în paralel, atunci rezistenţa echivalentă este de 5Ω.

Se pot, de asemenea, realiza legături mixte, cu unele ramuri în serie şi altele în paralel.

2) Dacă în figura 3.22 a) avem R_1=3Ω, R_2=2Ω şi **E**=10V, atunci intensitatea (≡curentul) este $I = \frac{1}{R_1 + R_2} \cdot \mathbf{E}$=2A.

3) Se consideră circuitul electric din figura 3.23. Să se indice un circuit mai simplificat, prin echivalarea rezistenţelor şi să se calculeze curentul prin fiecare rezistenţă dacă **E**=8V, R_1=4Ω, şi R_2=R_3=1Ω.

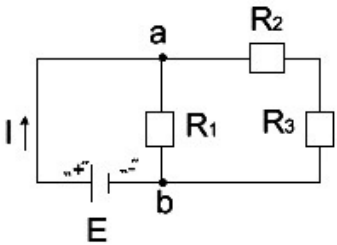


Fig. 3.23

<u>Soluţie:</u> Rezistenţele R_2 şi R_3 pot fi înlocuite cu rezistenţa echivalentă R_s=R_2+R_3=2 Ω, şi curentul I se separă în doi curenţi I_1, I_2, ca în figura 3.24.

Apoi cele două rezistenţe rămase se pot lega în paralel şi înlocui cu rezistenţa R_p astfel încât, conform formulei (19), $\frac{1}{R_p} = \frac{1}{4} + \frac{1}{2} = \frac{3}{4}$, deci R_p=$\frac{4}{3}$Ω.

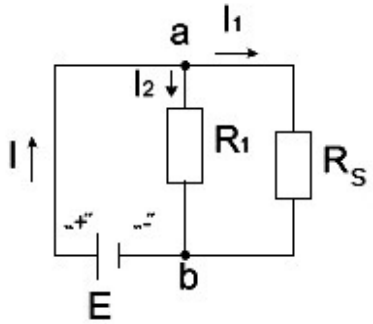


Fig. 3.24

Se obţine circuitul din figura 3.25, echivalent cu cel iniţial. Atunci intensitatea $I = \frac{1}{R_p} \cdot \mathbf{E}$=6A. Pe rezistenţele R_1, R_s din figura 3.24 avem aceeaşi cădere de potenţial şi vom avea $I_2 \cdot R_1 = I_1 \cdot R_s$ şi $I = I_1 + I_2$, adică $4I_2=2I_1$ şi $I = I_1 + I_2$=6A, de unde I_1=4 A şi I_2=2 A.

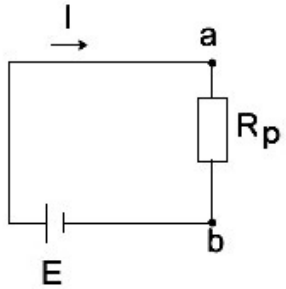


Fig. 3.25

<u>Aplicaţie:</u>

O întrebare tipică este următoarea: din ce cauză „se arde” o rezistenţă, un încălzitor, un reşou sau un bec? Răspunsul tipic este: datorită creşterii prea mari a **puterii** curentului electric.

Reamintim formulele (15) şi (16) care exprimă puterea

degajată pe o rezistenţă *R,* anume $P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$, unde *U* este diferenţa potenţialelor la capetele rezistenţei şi *I*=intensitatea curentului. Am văzut că aceste formule sunt echivalente, conform legii lui Ohm. Dacă tensiunea *U* este constantă, se pare că intensitatea *I* ar fi cauza căutată (deoarece intervine la pătrat).

Să considerăm următoarea situaţie: un reşou electric cu apă pusă la încălzit are trei secţiuni fiecare având aceeaşi rezistenţă *(R)* Dacă toate aceste secţiuni sunt legate în paralel, s-a constatat că apa a fiert în T_0=4 minute. Să aflăm după câte minute va fierbe apa în cazul legăturilor din fig. 3.26; a), b), c

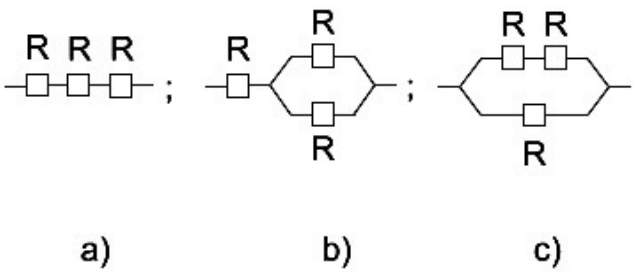


Fig. 3.26

În situaţia legării în paralel, $\frac{1}{R_p} = \frac{3}{R}$, avem $R_p = \frac{R}{3}$;

apoi, R_a=3R, $R_b = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2}$ şi $R_c = \frac{2R}{3}$. Să notăm cu T_a,,T_b, T_c, duratele, necesare pentru încălzirea apei în cele trei cazuri. Deoarece căldura degajată de reşou este dată de legea lui Joule

şi este aceeaşi în toate cazurile, atunci notând cu U tensiunea introdusă în reşou, rezultă $\frac{U^2 \cdot T_0}{R/3} = \frac{U^2 \cdot T_a}{3R} = \frac{U^2 \cdot T_b}{3R/2} = \frac{U^2 \cdot T_c}{2R/3}$, adică $3T_0 = \frac{T_a}{3} = \frac{2T_b}{3} = \frac{3T_c}{2}$. Deoarece T_0=4, rezultă T_a=36 min., T_b=18 min. şi T_c=8 min. Întrebarea pusă rămâne deschisă!

4.2. Legile lui Kirchhoff

Se întâlnesc circuite electrice complexe în curent continuu, alcătuite din mai multe elemente de circuit. Există o procedură pentru determinarea unor relaţii între tensiuni şi curenţi în reţele ramificate; procedura extinde regulile I şi II menţionate anterior. Timpul nu intervine (aici relaţiile sunt independente de momentele la care sunt scrise) şi se spune că reţelele considerate sunt staţionare. Orice reţea electrică are:

- **noduri** (puncte de ramificaţie, unde se întâlnesc minimum 3 conductori);
- **ramuri** (≡**laturi**) – porţiuni între noduri succesive, care nu conţin noduri în interior şi care sunt parcurse de acelaşi curent;
- **contururi** (≡**ochiuri** sau bucle) – succesiuni de ramuri formând linii poligonale închise, ramurile trecând o singură dată prin acelaşi nod.

Exemplificăm aceşti termeni pe reţeaua din figura 3.27.

Punctele *a* şi *b* sunt noduri (dar *c*, *d* şi *e*, nu); apoi *aeb*, *acb*, *adb* sunt ramuri, iar *adbea* şi *acbda* sunt contururi.

Paşii procedurii sunt următorii:

1. Se alege arbitrar un sens pentru curenţii din fiecare ramură.

2. Se alege un sens de referinţă de parcurs al frontierei contururilor.

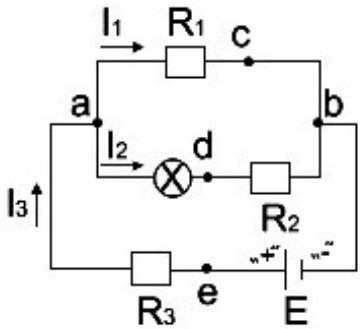


Fig. 3.27

3. **<u>LEGEA K_I</u>** (legea nodurilor): „În fiecare nod, suma algebrică a curenţilor este nulă (adică suma intensităţilor curenţilor care ies din nod este egală cu suma celor care intră)”.

Dacă reţeaua are *n* noduri, se obţin maximum *n*–1 ecuaţii independente; de exemplu, în figura 3.27, în nodul a, avem $I_3 = I_1 + I_2$.

4. **<u>LEGEA K_{II}</u>** (legea contururilor): „Suma algebrică a tensiunilor consumatorilor aflaţi pe un contur de reţea este egală cu suma algebrică a forţelor electromotoare ale generatoarelor de pe acel contur”.

Aşadar: $\sum_k I_k \cdot R_k = \sum_k$ $\mathbf{E}_k$. [Regula se aplică pentru fiecare contur, respectând sensul pozitiv ales; produsul $I_k \cdot R_k$ se consideră pozitiv când curentul are sensul pozitiv de parcurs, iar $\mathbf{E}_k$ este pozitiv dacă sensul de referinţă al conturului intră prin

polul „–”]. Dacă reţeaua are n noduri şi c ochiuri, se obţin maximum $n+c-1$ ecuaţii.

În general, sunt necesare şi suficiente atâtea ecuaţii câte necunoscute există. Dacă se obţin intensităţi negative, înseamnă că acei curenţi sunt de fapt în sens contrar celui ales.

Pentru o ramură AB parcursă de la A la B, semnele pentru $\mathbf{E}_k$ şi I_k urmează convenţiile anterioare şi avem $V_A - V_B = \sum_k I_k \cdot R_k - \sum_k \mathbf{E}_k$.

<u>Exemple:</u> 1) În figura 3.28 cu $V_A > V_B$, avem $V_A - V_B = IR$ şi în figura 3.29, cu sensul de referinţă indicat, legea K_{II} devine $I \cdot R - \mathbf{E} + I \cdot r = 0$, de unde $I = \frac{1}{R+r} \cdot \mathbf{E}$. Regăsim astfel legea lui Ohm şi formula (9).

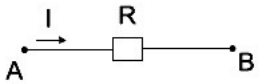


Fig. 3.28

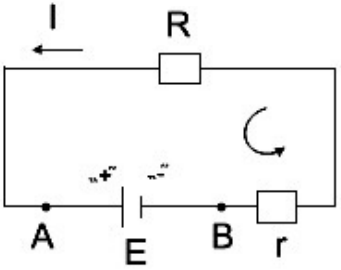


Fig. 3.29

2) Fie conturul fără noduri din figura 3.30, cu sensul de referinţă indicat „$\longrightarrow$”.

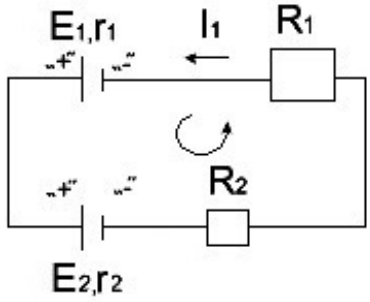


Fig. 3.30

Conform K_{II}, $I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot r_1 - I_1 \cdot r_2 - I_1 \cdot R_2 = \mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2$.

3) Se consideră conturul (≡ochiul) de reţea din figura 3.31, având 3 noduri, unde am indicat rezistenţele interne ale generatoarelor (asimilate cu rezistenţe situate pe ramuri) şi sensul de referinţă. Conform K_I: $I_1=I_2$ (în nodul a) şi $I_2=-I_3$ (în nodul b). Apoi. $I_1 \cdot r_1 + I_2 \cdot r_2 - I_3 \cdot r_3 = -\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_3$.

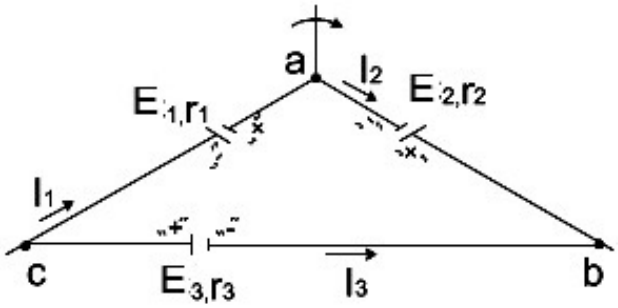


Fig. 3.31

4) Fie reţeaua din figura 3.32, având nodurile *C*, *D* şi contururile *ADCBA* şi *DEFCD* şi cu sensul de referinţă indicat.

Conform K_I aplicată în nodul *D*, rezultă $I_1+I_3=I_2$.

Apoi, conform K_{II} pentru contururile menţionate, rezultă $I_1 \cdot r_1 - I_3 \cdot r_2 = \mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2$, $I_2 \cdot R + I_3 \cdot r_2 = \mathbf{E}_2$. Se rezolvă acest sistem liniar de 3 ecuaţii cu 3 necunoscute, anume I_1, I_2, I_3.

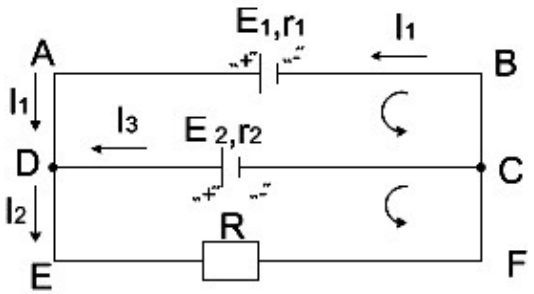


Fig. 3.32

5) Se consideră reţeaua din figura 3.33, unde $\mathbf{E}_1$=12V, $\mathbf{E}_2$=3V, R=6Ω, r_1=r_2=3Ω. Să se determine: a) Curenţii pe fiecare ramură; b) Tensiunea la bornele rezistorului; c) Curentul prin conductorul fără rezistenţă plasat în locul lui R („scurtcircuit”).

<u>Soluţie:</u> Alegem câte un sens de referinţă. Reţeaua are trei ramuri, două noduri (A şi B) şi trei contururi. Conform K_I şi K_{II}, avem $I = I_1 + I_2$, $I_1 \cdot r_1 + I \cdot R = \mathbf{E}_1$, $I_2 \cdot r_2 - I_1 \cdot r_1 = \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1$.

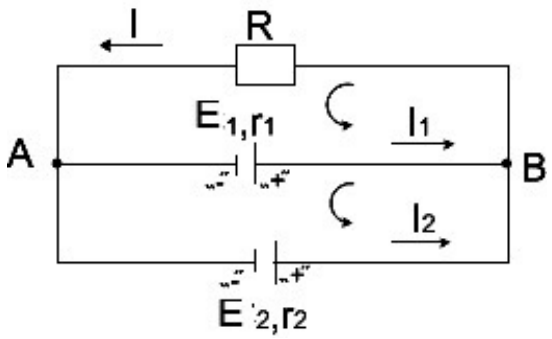


Fig. 3.33

a) Înlocuind valorile concrete, rezultă $3I_1+6I=12$, $3I_2-3I_1=-9$, de unde $I_1+2I=4$, $I_2-I_1=-3$ şi rezultă $I=1A$, $I_1=2A$, $I_2=-1A$. Valorile lui I şi I_1 sunt pozitive, deci sensul curenţilor coincide cu sensul de referinţă ales. Dar I_2 are sens invers.

b) $U = R \cdot I = 6 \times 1 = 6V$;

c) La scurtcircuit, $R \to 0$ şi $I_{sc} = \frac{1}{r_1} \cdot \mathbf{E}_1 + \frac{1}{r_2} \cdot \mathbf{E}_2 = 5A$.

<u>Notă:</u> 1) Dacă într-un circuit simplu, rezistenţa interioară este $r \cong 0$ (neglijabilă în raport cu rezistenţa exterioară), atunci $U \cong \mathbf{E}$. Dacă r este mult mai mare în raport cu R, atunci $I \cong I_{sc}$.

2) Dacă în reţea există mai multe generatoare ($\mathbf{E}_k$, r_k) legate în serie, ele se pot unifica într-un singur generator ($\mathbf{E}$, r), unde $\mathbf{E} = \sum_k \mathbf{E}_k$ şi $r = \sum_k r_k$.

La legarea în paralel, generatoarele se unesc într-unul singur ($\mathbf{E}$, r), unde $\mathbf{E} = (\sum_k \frac{1}{r_k} \mathbf{E}_k)/(\sum_k \frac{1}{r_k})$ şi $\frac{1}{r} = \sum_k \frac{1}{r_k}$.

§5. <u>FENOMENE MAGNETICE</u>

5.1. <u>Câmpul magnetic</u>

De mult timp, s-a observat că în natură există fascinanţii magneţi permanenţi (≡minereuri care atrag alte corpuri feromagnetice de tip Fe, Cu, Ni). Extremităţile unui magnet se numesc **poli** (N–„Nord” şi S–„Sud”), care nu există separat. Dacă se rupe un magnet în două părţi, apar alţi doi magneţi, fiecare cu polii săi, iar polii cu acelaşi nume se resping.

În Evul Mediu, chinezii au inventat **busola** – un cadran cu un ac care se deplasează pe axa NS a polilor magnetici ai Pământului. La începutul secolului al XIX-lea, fizicianul danez Oersted a observat că în apropierea unui conductor parcurs de curent electric, acul magnetic al busolei este deviat de la direcţia normală NS şi atunci când circuitul electric este întrerupt, acul revine la poziţia iniţială; astfel, el a descoperit **efectul magnetic al curentului electric.** Sarcinile electrice fixe nu produc efecte magnetice, dar curentul electric este un flux de sarcini în mişcare.

Aşadar, sarcinile electrice staţionare generează un câmp electric, iar cele aflate în mişcare, generează atât câmp electric, cât şi unul magnetic, ambele inter-legate. Fizicianul englez Michael Faraday a arătat că în jurul unui magnet permanent N–S, pilitura de fier presărată pe o masă se aşază pe nişte curbe închise care unesc polii (figura 3.34).

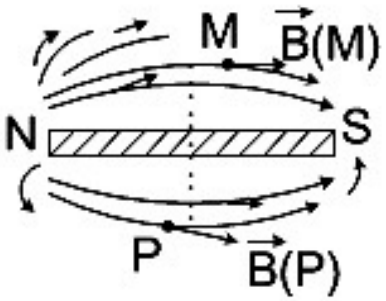


Fig. 3.34

Tot Faraday a fost primul care a introdus noţiunea de câmp şi a numit acele curbe linii magnetice, care indică orientarea câmpului.

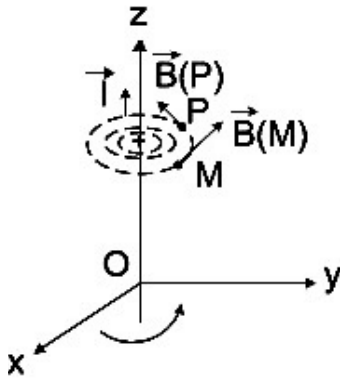


Fig. 3.35

În plus, a explicat experimentul lui Oersted; anume, dacă un curent trece printr-un conductor, ca în figura 3.35, dispus pe axa *Oz*, atunci în jurul conductorului se află linii magnetice circulare închise; sensul de deplasare a curentului, spre *Oz* pozitiv, este dat de celebra „regulă a burghiului”, adică rotind *Ox* peste *Oy* pe drumul cel mai scurt, sensul pozitiv este acela în care burghiul înaintează.

Acelaşi lucru s-a constatat mai târziu şi în cazul unei bobine (≡**solenoid**), adică al unui fir metalic înfăşurat pe un suport izolator, ca în figura 3.36.

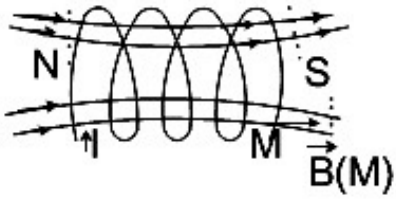


Fig. 3.36

Definiţie: **Câmpul magnetic** este un câmp vectorial, care asociază fiecărui punct M din vecinătatea unui magnet sau a unui conductor străbătut de sarcini electrice în mişcare, un vector $\vec{B}(M)$, tangent în M la linia magnetică trecând prin acel punct.

Mărimea $B(M) = \left\|\vec{B}(M)\right\|$ se numeşte **inducţia magnetică** (în punctul M).

Aşadar, un curent electric generează un câmp magnetic şi Faraday a arătat că şi invers, un câmp magnetic în mişcare produce curent electric, descoperind astfel fenomenul de inducţie magnetică şi deschizând era motoarelor electrice şi a electromagnetismului. După 1850, Maxwell a stabilit legătura matematică dintre câmpurile electric şi magnetic, formulând un set de ecuaţii ale câmpului electromagnetic. Există şi o problemă rămasă încă fără răspuns, anume cea a inventării monopolului (magnetul cu un singur pol).

Notă: Pentru a determina mărimea $\varepsilon \cdot \frac{|q|}{r^2}$ a câmpului electrostatic $\vec{E}_q$ generat de o sarcină electrică punctuală q (conform 1.2) într-un punct M aflat la distanţa r de sarcina q, se plasează în punctul M o mică sarcină pozitivă, de testare, ceea ce permite măsurarea forţei care acţionează asupra sarcinii w. Atunci $\vec{F} = w\vec{E}_q(M)$. S-a pus problema măsurării acţiunii câmpului magnetic, apelând la pilitura de fier sau la acul de busolă, dar s-a adoptat o altă soluţie, anume considerând un

cadru de curent (adică un contur metalic de arie „mică”, parcurs de un curent electric, ca în figura 3.37).

Se constată experimental că un câmp magnetic nu acţionează asupra sarcinilor electrice aflate în repaus.

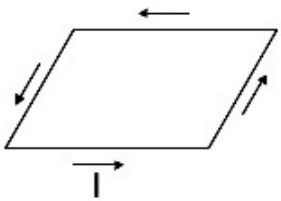


Fig. 3.37

Un magnet simplu (de fapt un mic **electromagnet**) de testare se poate construi înfăşurând o sârmă în jurul unui miez de fier şi conectând capetele sârmei la bornele unei baterii, ca în figura 3.38. Electromagneţii sunt bobine având un miez de fier în interior; ei au diverse forme şi pot susţine încărcături suspendate (fiind folosiţi la transport de lingouri), dar şi la telefoane, motoare electrice, relee etc.

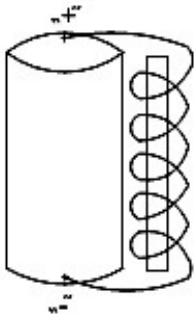


Fig. 3.38

Dacă un corp aflat într-un câmp magnetic este supus unor forţe produse de un curent electric, se spune că el se află în **starea de magnetizare**.

Câmpul magnetic al Pământului

S-a observat că un ac magnetic care se poate roti liber în jurul unei axe verticale se orientează spre un anumit punct de pe Pământ, chiar dacă nu există în vecinătate magneţi sau conductori purtători de curent. Acest fapt se explică prin existenţa unui câmp magnetic în jurul Pământului (utilizat, de exemplu, de păsările migratoare). Acul magnetic al busolei arată Nordul geografic doar aproximativ.

Polul Nord Magnetic al Pământului este punctul de pe suprafața emisferei nordice în care câmpul magnetic al Pământului este îndreptat direct în jos. Deși geografic se află în partea de Nord a planetei, el este, conform direcției liniilor de câmp magnetic, din punct de vedere fizic un „Sud” magnetic. Polul Nord Magnetic nu trebuie confundat cu Polul Nord Geografic, și nici cu Polul Nord Geomagnetic.

Din cauza modificărilor în câmpul magnetic al Pământului, datorate erupţiilor solare, apar „furtuni magnetice”.

Dar tot câmpul magnetic este cel care ne protejează de radiaţia cosmică. Luna nu are câmp magnetic.

Înainte de a merge mai departe, reamintim pe scurt proprietăţile produsului vectorial a doi vectori. Dacă $\vec{u}$, $\vec{v}$ sunt doi vectori nenuli, pe care îi putem presupune ca având acelaşi punct de aplicaţie, se defineşte un al treilea vector $\vec{w} = \vec{u} \times \vec{v}$,

perpendicular pe $\vec{u}$ şi $\vec{v}$, având sensul dat de regula burghiului rotit de la $\vec{u}$ spre $\vec{v}$ şi cu mărimea $\left\|\vec{w}\right\| = u \cdot v \cdot \sin\alpha$, unde $\alpha = (\widehat{\vec{u},\vec{v}})$. Dacă $\vec{u} \perp \vec{v}$, atunci $w = u \cdot v$ (valoarea maximă posibilă) şi $w = 0 \Longleftrightarrow \vec{u}$ şi $\vec{v}$ au suporturile paralele.

Să considerăm acum un magnet în formă de „U” şi un conductor rectiliniu *AB* de lungime relativ mică – *l*, aşezat între polii magnetului, ca în figura 3.39.

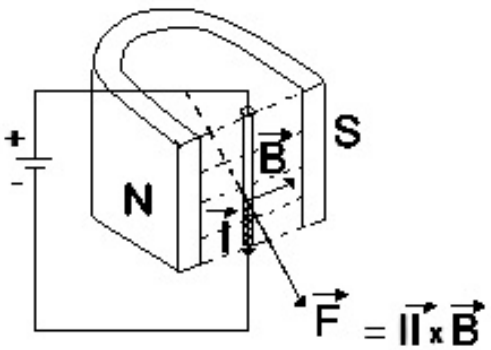


Fig. 3.39

Aplicând o tensiune constantă la capetele conductorului, fizicianul francez Ampère a arătat că există o forţă $\vec{F}$, numită **forţa magnetică** (de fapt un câmp vectorial de forţe), acţionând pe conductor şi a cărei expresie este

$$\vec{F} = l \cdot \vec{I} \times \vec{B} \qquad (20)$$

unde $\vec{B}$ este câmpul magnetic, $\vec{I}$ fiind un vector în sensul conductorului $\overrightarrow{AB}$ şi de mărime cât intensitatea curentului electric. În fiecare punct *M* al conductorului, vectorii $\vec{B}(M)$,

$\vec{F}(M)$ arată ca în figura 3.39 (în continuare, nu mai indicăm explicit punctul *M)*.

Aşadar, $\vec{F} \perp \vec{I}$, $\vec{F} \perp \vec{B}$ şi mărimea forţei magnetice este:

$$F = l \cdot I \cdot B \cdot \sin\alpha \qquad \text{unde } \alpha = \widehat{(\vec{I},\vec{B})} \qquad (21)$$

Valoarea F este maximă dacă $\alpha = \frac{\pi}{2}$, adică dacă $\vec{B} \perp \vec{I}$ şi F=0, atunci $\vec{B}$ şi $\vec{I}$ au suporturi paralele.

5.2. <u>Legea lui Lorentz</u>

Fie q o sarcină electrică ce se deplasează cu viteza $\vec{v}$ printr-un conductor rectiliniu de lungime l. Dacă în câmpul magnetic creat avem $\vec{B} \perp \vec{I}$, atunci $F = l \cdot I \cdot B$; notând cu t durata parcurgerii conductorului de către sarcina q, atunci $l=vt$, deci $F = v \cdot B \cdot I \cdot t = v \cdot B \cdot q$ (deoarece $q=It$). Conform formulei (20), rezultă $\vec{F} = (vt)\vec{I} \times \vec{B} = t(I\vec{v}) \times \vec{B} = (It)\vec{v} \times \vec{B}$.

Am stabilit astfel

<u>LEGEA LUI LORENZ</u>: „Forţa magnetică care acţionează asupra unei sarcini electrice q care se deplasează cu viteza $\vec{v}$ printr-un conductor rectiliniu este

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}\text{”} \qquad (22)$$

<u>Exemplu:</u> Presupunem că într-un anumit loc, câmpul magnetic al pământului $\vec{B}$ face unghiul α=20° cu verticala şi are valoarea $B=6\times10^{-5}$ T. Să se determine forţa Lorenz F a acelui câmp asupra unui electron care se deplasează vertical cu

10^5 m/s. De câte ori este această forţă mai mare decât greutatea electronului?

Soluţie: Conform (22) avem $F = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha$, unde $\alpha = \widehat{(\vec{v}, \vec{B})}$. Dar $q = 1{,}6 \times 10^{-19} C$; $v = 10^5 m/s$; $\sin\alpha \cong 0{,}31$, deci $F \cong 2{,}98 \times 10^{-19} N$.

Apoi masa electronului este $M_e \cong 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg şi greutatea lui este $G = M_e g \cong 89{,}3 \times 10^{-31}$ N.

Raportul cerut este $\dfrac{2{,}98 \times 10^{-19}}{89{,}3 \times 10^{-31}} \cong 3 \times 10^{10}$.

Notă: Considerând un conductor electric (γ) nu neapărat rectiliniu, prin care trece un curent de intensitate I şi notând cu $d\vec{r}$ vectorul–deplasare elementară în punctul curent M de pe curba (γ), produsul $I d\vec{r}$ se numeşte curent elementar (fig. 3.40).

Conform formulei (20), forţa magnetică este $\vec{F} = l \cdot \vec{I} \times \vec{B}$ şi la nivel diferenţial, $d\vec{F} = dl \cdot \vec{I} \times \vec{B}$.

Notând cu v viteza purtătorilor de sarcină prin conductorul considerat, $l = v \cdot t$, $dl = v \cdot dt$, $\vec{v}dt = d\vec{r}$, deci $d\vec{F} = \vec{I} \cdot (vdt) \times \vec{B} = I(\vec{v}dt) \times \vec{B} = I(d\vec{r} \times \vec{B})$.

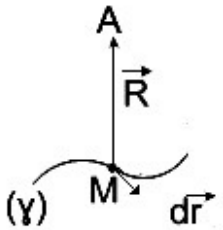


Fig. 3.40

Ca atare, am demonstrat următorul

<u>COROLAR</u>: „Forţa magnetică asupra unui conductor γ prin care trece un curent electric de intensitate *I* este

$$\vec{F} = I\int_{\gamma} d\vec{r} \times \vec{B} \text{ ”.} \qquad (23)$$

Se poate de asemenea arăta că pentru orice punct *A* din vecinătatea conductorului, câmpul magnetic $\vec{B}$ are valoarea

$$\vec{B}(A) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_{\gamma} \frac{Id\vec{r} \times \vec{R}}{R^3}, \qquad (24)$$

unde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} V \cdot s / A \cdot m$ (numită **permeabilitatea vidului** sau **constanta magnetică**). Această formulă se numeşte **legea Biot–Savart–Laplace** şi stă la baza obţinerii valorilor câmpului magnetic in diverse ipostaze. De exemplu, în cazul unui conductor liniar infinit, câmpul magnetic generat de un curent constant *I* într-un punct *A* situat la distanţa *d* de conductor, are mărimea $B(A) = \frac{2\mu_0 I}{d}$. Similar, inducţia magnetică în centrul unui conductor circular de rază *R*, prin care trece un curent cu intensitatea *I*, este $B = \frac{2\pi\mu_0 I}{R}$. Nu intrăm în detalii.

Am văzut că dacă $\vec{B} \perp \vec{I}$, atunci $F = l \cdot I \cdot B$ şi $B = \frac{F}{l \cdot I}$ (conform fomulei (21)). Inducţia magnetică $B = \left\|\vec{B}\right\|$ se măsoară în Tesla ([T]) şi atunci 1T=1N/Am este tocmai inducţia care realizează forţa magnetică de 1N asupra unui conductor de

lungime 1 m, prin care trece un curent de 1A, perpendicular pe liniile de câmp ale câmpului magnetic $\vec{B}$. [N. Tesla a fost un inventator istro–român, la începutul secolului al XX-lea, revendicat în egală măsură de sârbi şi croaţi; el este cel care a revoluţionat Electromagnetismul şi „levitaţia magnetică”].

Să presupunem că într-un punct dintr-un spaţiu vid se introduce un mic corp electrizat de testare; atunci el are o sarcină electrică q şi asupra sa se exercită o forţă $q\vec{E}$. Dacă acel corp se deplasează cu viteza $\vec{v}$, atunci asupra corpului se exercită forţa $\vec{F}_{em} = q\vec{v}\times\vec{B} + q\vec{E} = q(\vec{v}\times\vec{B} + \vec{E})$, numită **forţa electromagnetică** generată.

Câmpul electric şi câmpul magnetic însoţesc împreună orice deplasare de sarcini electrice în lungul unui mediu conductor.

Inducţia magnetică depinde de mărimea curentului care o generează, dar şi de proprietăţile fizice ale mediului (prin constanta magnetică).

<u>Exemplu:</u> Dacă I=5A, l=1m, $B = 2\times10^{-3}$ T(“Tesla”) şi α=30°, atunci, conform (21) $F = 1\times5\times2\times10^{-3}\times\frac{1}{2} = 5\times10^{-3}$ N.

5.3. <u>Flux magnetic, inducţie electromagnetică, autoinducţie</u>

<u>Definiţie:</u> **Fluxul** câmpului magnetic $\vec{B}$ printr-o placă plană de arie A este scalarul $\Phi = (\vec{B}\cdot\vec{n})\cdot A$, unde $\vec{n}$ este versorul normalei la plan (figura 3.41).

Notând $\alpha = \measuredangle(\vec{B},\vec{n})$, rezultă formula

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos\alpha \qquad (25)$$

Fluxul se măsoară în **weber** [Wb]. Atunci, 1Wb=1Tm^2 este fluxul printr-o placă cu aria 1m^2, străbătută normal (α=0°) de un câmp magnetic cu mărimea 1T.

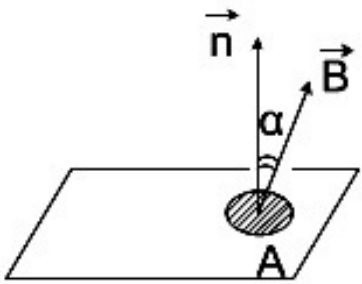


Fig. 3.41

Se poate defini fluxul unui câmp magnetic printr-o suprafaţă nu neapărat plană, dar având două feţe (de exemplu suprafaţa unei calote sferice sau suprafaţa laterală a unui cilindru). Gauss a arătat că fluxul printr-o suprafaţă închisă (sfera, elipsoidul sau tetraedrul) este nul.

<u>Exemplu:</u> Dacă A=1m^2, B=3T şi α=60°, atunci $\Phi = 3 \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} = 1{,}5$ Wb.

<u>Notă:</u> Am văzut că inducţia magnetică B se măsoară în:

$$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}} = \frac{\mathrm{N}}{\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{V}} \cdot \mathrm{m}} = \frac{\mathrm{N \cdot V}}{\mathrm{W \cdot m}} = \frac{\mathrm{N \cdot V \cdot s}}{\mathrm{W \cdot m \cdot s}} = \frac{\mathrm{N \cdot V \cdot s}}{\mathrm{J \cdot m}} = \frac{\mathrm{N \cdot V \cdot s}}{(\mathrm{N \cdot m}) \cdot \mathrm{m}} = \frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{m}^2}$$

Atunci fluxul se măsoară în Vs deci 1Wb=1Vs (volt-secundă). Fluxurile magnetice se măsoară cu fluxmetre. Pentru a varia fluxul Φ trebuie modificate B, A sau α. De exemplu, dacă

se translatează placa A, fluxul nu se modifică. Dar dacă $\vec{B}$ nu este constant sau dacă placa de arie A se roteşte într-un câmp magnetic constant, atunci Φ variază. S-a constatat experimental că prin variaţia fluxului magnetic **se generează curent electric** (de exemplu, introducând sau scoţând un magnet permanent dintr-o bobină sau deplasând un conductor în câmp magnetic).

Exemplu: Considerăm un fir conductor cu capetele conectate la un galvanometru. Mişcând conductorul între braţele unui magnet–potcoavă, astfel încât conductorul să întâlnească liniile magnetice, se constată că acul galvanometrului este deviat; acelaşi lucru are loc şi dacă se fixează conductorul şi se mişcă magnetul. Aşadar, între capetele conductorului a apărut o diferenţă de potenţial, fiind indus un curent electric (termenul „indus" referindu-se la cauza apariţiei).

Definiţie: Fenomenul prin care este generată forţa electromotoare $\mathbf{E}_i$ într-un circuit electric străbătut de un flux magnetic variabil în timp se numeşte **inducţie electromagnetică**. Curentul electric care apare prin conturul închis al plăcii se numeşte **curent de inducţie** (sau **curent indus**).

Fenomenul inducţiei electromagnetice a fost descoperit de Faraday, care a stabilit:

LEGEA LUI FARADAY (a inducţiei electromagnetice):

„Forţa electromotoare $\mathbf{E}_i$ este proporţională cu viteza de variaţie a fluxului Φ în raport cu timpul:

$$\mathbf{E}_i = -\Phi'(t) \cong -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ ”} \qquad (26)$$

Semnul „–” este explicat de:

LEGEA LUI JOULE–LENZ: „Curentul electric de inducţie este orientat astfel încât câmpul generat de el să acţioneze împotriva cauzei care l-a produs”.

Aşadar, curentul indus se opune variaţiei fluxului magnetic care l-a produs. Elevii glumeţi spun asta în versuri: „Eu, curentul cel indus, totdeauna m-am opus forţei care m-a produs!”. Această afirmaţie se regăseşte într-un principiu mai general – **principiul filozofic al lui Le Chatelier**, conform căruia: „Dacă asupra unui sistem (fizic, chimic, social etc.) aflat în echilibru, se aplică o constrângere, atunci sistemul va reacţiona, diminuând acea constrângere”.

Până acum am întâlnit curenţi induşi în circuitele cu conductori rectilinii, dar în reţele şi motoare electrice industriale apar şi nişte curenţi Foucault, acolo unde se concentrează mai mult fier sau cupru.

Notă: Proiectarea şi funcţionarea generatoarelor (surse de curent) se bazează pe inducţia electromagnetică. Atunci când cadrul de curent din figura 3.42 se roteşte într-un câmp magnetic, apare un curent electric, aşa cum am văzut. Generatoarele de mare putere sunt folosite în industrie pentru producere de curent, ele fiind acționate de motoare termice sau cu turbine de abur. Unitatea generator/turbină formează un **turbogenerator**, care transformă energia combustibililor

(cărbune, ţiţei, gaze) sau energia mecanică (hidro, eoliană) în energie electrică.

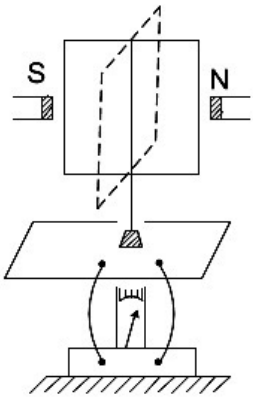


Fig. 3.42

Exemplu: Un cadru de curent are suprafaţa A=0,1m^2 şi rezistenţa de 5Ω. Un câmp magnetic $\vec{B}$ normal la cadru are valoarea 0,1T. S-a redus viteza cadrului până la anulare în 1ms (milisecundă). Să se determine f.e.m. indusă şi curentul indus rezultat.

Soluţie: Fluxul iniţial este $\Phi_i = B \cdot A$ şi fluxul final este nul deci $\Delta\Phi = -B \cdot A$ şi, conform legii lui Faraday (26),

$$\mathbf{E}_i \cong -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B \cdot A}{\Delta t} = \frac{0{,}1 \times 0{,}1}{10^{-3}} = 10\,\text{V},\ I = \frac{1}{R} \cdot \mathbf{E} = \frac{10}{5} = 2\,\text{A}.$$

Autoinducţia

Am văzut că variaţia fluxului magnetic conduce la apariţia unei f.e.m. (conform legii lui Faraday) şi a unui curent de inducţie. Dar şi variaţia intensităţii $I(t)$ a curentului electric dintr-un circuit conduce la variaţia fluxului magnetic creat de

acest curent şi ca rezultat, va apărea o anumită forţă electromotoare, numită **f.e.m. de autoinducţie** atât în acel conductor, cât şi în cei vecini. Autoinducţia implică apariţia unei tensiuni U într-un circuit care conţine o bobină, la trecerea unui curent cu intensitate variabilă. Fenomenul de autoinducţie se resimte mai puternic la comutarea sau la întreruperea curentului.

LEGEA AUTOINDUCŢIEI (a lui HENRY–LENZ):

„Tensiunea U este proporţională cu viteza de variaţie a intensităţii:

$$U = -L \cdot I'(t) \cong -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad (27)$$

unde $L>0$ este o constantă, numită **inductanţa** (sau coeficientul de autoinducţie)”. Autoinducţia a fost descoperită de fizicianul american J. Henry, ca inducţie electromagnetică datorată variaţiei intensităţii curentului electric.

Constanta L depinde de configuraţia reţelei electrice unde se manifestă şi de materialele utilizate.

L se măsoară în Henry [H]; 1 H=1 Vs/A≡1 Wb/A, deci 1H este inductanţa unui circuit parcurs în 1s de un curent cu intensitatea de 1A, la tensiunea de 1V. Toate circuitele electrice au o anumită inductanţă, care poate produce efecte benefice sau negative; inductanţa are un rol important în circuitele de curent alternativ sau în echilibrarea efectelor condensatoarelor în dispozitivele din Telecomunicaţii.

Exemplu: Inductanţa L intervine la studiul circuitelor oscilante de înaltă frecvenţă; astfel, vom vedea că perioada oscilaţiilor electromagnetice într-un contur închis are expresia

$T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$ (formula Hertz–Thomson). Pentru mărirea inductanţei unui contur închis oscilant, conductorul se răsuceşte ca un solenoid. De aceea, prin abuz de limbaj, se spune că un solenoid este un contur oscilant care constă dintr-o capacitate şi o inductivitate.

Notă: Reluăm întrebarea pusă în subparagraful 4.1: „de ce se ard becurile?” Se spune că în reţeaua electrică domestică, la stingerea luminii apare un curent suplimentar, numit „curent de întrerupere”. Curentul I prin bec poate creşte, dar arderea becului nu are loc din cauza autoinducţiei; becul nu se arde în momentul întreruperii, ci la cuplare; după ce acţionăm întrerupătorul, lumina se aprinde instantaneu şi abia mai târziu, se arde becul. Pentru apariţia autoinducţiei, este necesar să existe o inductanţă L suficient de mare, ceea ce nu este cazul. Arderea becului este legată de faptul că rezistenţa conductorului creşte cu mărirea temperaturii lui (la aprinderea luminii, temperatura filamentului depăşeşte 2000°C şi puterea devine mai mare decât cea antecalculată).

„**Curenţii de întrerupere**” apar în reţele electrice industriale, unde valoarea lui L este semnificativă.

§6. CURENTUL ELECTRIC ALTERNATIV

În acest capitol, am început studiul fenomenelor electrice cu prezentarea curentului electric continuu (numit şi direct sau unidirecţionat). Curentul continuu este produs de o baterie sau de un acumulator având polii „+” şi „–” fixaţi, tensiunea având

polaritatea constantă. Există însă surse de curent, aşa cum sunt generatoarele electromecanice, care utilizează inducţia electromagnetică şi produc tensiuni alternative ca polaritate, intervertind în mod periodic polii. Diversele motoare electrice, sisteme de transport şi distribuţie a energiei electrice utilizează curentul alternativ. Energia electrică ne este furnizată acasă tot în curent alternativ, cu frecvenţa de 50 Hz. În funcţionarea lor, multe aparate – radio, televizoare, calculatoare etc. - folosesc curentul continuu, care se obţine conectând un redresor înaintea intrării în aparat.

6.1. Generatorul de curent alternativ

La baza funcţionării generatoarelor electrice stă legea lui Faraday (26). Considerăm un cadru conductor plan de arie A, aflat într-un câmp magnetic $\vec{B}$ şi rotit cu viteza unghiulară $\omega(\omega > 0)$ prin consum de energie mecanică (figura 3.43).

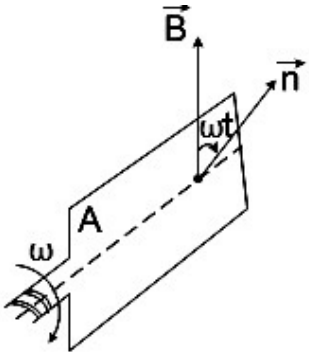


Fig. 3.43

Extremităţile conductorului alunecă pe două inele metalice fixe. La orice moment t, unghiul dintre versorul $\vec{n}$ al

normalei la plan şi vectorul $\vec{B}$ este ωt şi, ca atare, fluxul câmpului prin cadrul conductor este $\Phi = (\vec{B} \cdot \vec{n}) \cdot A = B \cdot A \cdot \cos \omega t$

Deoarece fluxul variază cu t, se creează f.e.m.=**E** $= -\Phi'(t) = \omega \cdot B \cdot A \cdot \sin \omega t$. Amplitudinea (≡valoarea maximă) acestei f.e.m. este $\mathbf{E}_0 = \omega \cdot B \cdot A$ ($\mathbf{E}_0$>0) şi, ca atare, diferenţa de potenţial astfel creată este

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 \sin \omega t \qquad (28)$$

Funcţia $t \to \mathbf{E}(t)$ variază între valorile $-\mathbf{E}_0$ şi $\mathbf{E}_0$, fiind periodică, având perioada $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$ şi frecvenţa $f = \dfrac{\omega}{2\pi}$ (măsurată în Hz). Graficul ei este o sinusoidă (figura 3.44).

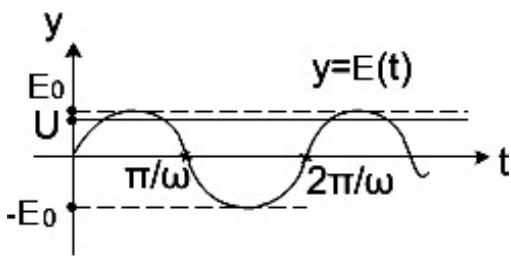


Fig. 3.44

<u>Definiţie:</u> Un circuit electric alimentat de o f.e.m. sinusoidală de forma (28) se numeşte **circuit de curent alternativ**. Dacă R este rezistenţa circuitului (presupusă constantă), atunci **curentul** prin circuit este:

$$I(t) = \frac{1}{R} \cdot \mathbf{E}(t) = I_0 \cdot \sin \omega t \text{ , unde } I_0 = \frac{1}{R} \cdot \mathbf{E}_0 \qquad (29)$$

Reţinem că amplitudinea tensiunii este $\mathbf{E}_0$ şi amplitudinea curentului este I_0 .

Notă: Este necesară o digresiune matematică. Pentru o funcţie continuă şi periodică $f(t)$ de perioadă T, **media ei pătratică** (notată uneori cu $\overline{f}$) este un număr real şi pozitiv care satisface relaţia $(\overline{f})^2 = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)^2\,dt$. De exemplu, pentru $f(t)=a$, constant, avem $\overline{f} = |a|$ şi pentru $f(t) = a\sin\omega t$, avem $(\overline{f})^2 = \frac{a^2}{T}\int_0^T \sin^2\omega t\,dt = \frac{a^2}{2T}\int_0^T (1-\cos 2\omega t)\,dt = \frac{a^2}{2}$.

Printr-o convenţie impusă de specialişti, se utilizează „valorile efective" ale tensiunilor şi curenţilor, care sunt mai bine adaptate pentru calculul puterilor circuitelor de curent alternativ. Voltmetrele şi ampermetrele alternative sunt calibrate tocmai pentru a indica valorile efective.

Definiţie: **Tensiunea efectivă** U şi respectiv **curentul efectiv** I, ale unui circuit alternativ sunt nişte constante pozitive, anume mediile pătratice ale tensiunii $\mathbf{E}(t)$ (respectiv curentului $I(t)$).

Aşadar, $U^2 = \frac{1}{T}\int_0^T \mathbf{E}(t)^2 dt \overset{cf.(28)}{=} \frac{1}{T}\mathbf{E}_0{}^2\int_0^T \sin^2\omega t\,dt = \frac{1}{2}\mathbf{E}_0{}^2$

(conform calculului anterior) şi similar, $I^2 = \frac{1}{2}I_0{}^2$, deci

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}}\cdot\mathbf{E}_0,\ I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{1}{R\sqrt{2}}\cdot\mathbf{E}_0,\ U = R\cdot I \qquad (30)$$

În figura 3.44 am indicat cu linie întărită dreapta orizontală a tensiunii efective.

Notă: Atunci când spunem că la reţeaua de acasă avem tensiunea de 220V, aceasta este tensiunea efectivă, adică U=220V şi tensiunea maximă (amplitudinea) este $\mathbf{E}_0 = 220 \times \sqrt{2} \cong 311\,\text{V}$.

Iată o justificare pentru considerarea valorii efective. În curentul alternativ, căldura dezvoltată de curent pe un interval de timp cât perioada este $Q = \int_0^T R \cdot I(t)^2\, dt = R\int_0^T I(t)^2\, dt$. În curent continuu, $Q = R \cdot I^2 \cdot T$, unde I este valoarea efectivă a intensităţii; comparând cele două formule, rezultă tocmai relaţia $I^2 = \frac{1}{T}\int_0^T I(t)^2\, dt$, adică I este media pătratică a lui $I(t)$ pe intervalul [0, T].

Exemplu: Să se expliciteze dependenţa tensiunii $\mathbf{E}(t)=\mathbf{E}_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ într-o reţea cu tensiunea efectivă U=220V şi frecvenţa ω=50Hz, ştiind că $\mathbf{E}(0)$=50V.

Răspuns: $\mathbf{E}_0$=U$\sqrt{2} \cong 311$V şi $\omega = 2\pi f = 100\pi \cong 314\,Hz$. În plus, $\mathbf{E}_0 \cos\varphi_0 = 50$, deci $\cos\varphi_0 = \frac{50}{311}, \varphi_0 \cong 1{,}4\,rad$. Aşadar, $\mathbf{E}(t) = 311 \cdot \cos(314t + 1{,}4)$.

Definiţie: **Puterea instantanee** a circuitului la momentul t este $P(t) = I(t)^2 \cdot R$ şi **puterea medie** este, conform (30),

$$\overline{P} = I^2 \cdot R = U \cdot I \qquad (31)$$

adică produsul dintre tensiunea efectivă şi curentul efectiv.

Exemplu: O plită electrică uzuală consumă în medie

puterea de 1kW pentru tensiunea efectivă de 220V. Să se determine amplitudinea tensiunii din reţea, curentul efectiv şi amplitudinea curentului.

Soluţie: Aşadar, U=220V şi conform (30), $\mathbf{E}_0 = 220\sqrt{2} \cong 311$. Apoi, $\overline{P} = U \cdot I$ conform (31), deci $I = \frac{\overline{P}}{U} = \frac{1000}{220} \cong 4{,}5$ A şi conform (29), $I = I_0\sqrt{2} \cong 6{,}4$ A.

6.2. Reactanţe

Să considerăm un rezistor (cu rezistenţa R), alimentat de la un generator de curent alternativ. Am văzut că valorile efective ale curentului şi tensiunii sunt legate prin relaţia (30), $U=RI$, deci au evoluţii similare în timp şi grafice similare $y=I(t)$ şi $y=RI(t)=\mathbf{E}(t)$ (figura 3.45). Se spune că prin rezistor, curentul şi tensiunea sunt în fază.

Dar să considerăm un condensator cu capacitatea C.

Dacă la bornele lui se aplică o tensiune continuă, atunci curentul nu circulă, deoarece este întrerupt de dielectricul (izolator) dintre armături.

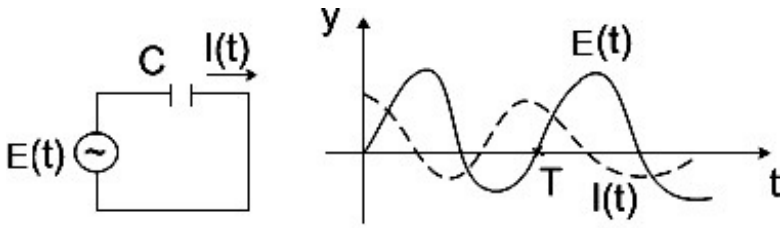


Fig. 3.45

Însă aplicând o tensiune alternativă $\mathbf{E}(t)=\mathbf{E}_0 \sin \omega t$, atunci periodic condensatorul se încarcă, apoi se descarcă, iar se reîncarcă etc. Întreg circuitul este atunci parcurs de un curent alternativ (figura 3.46).

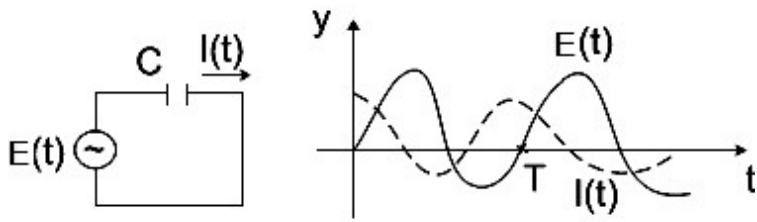


Fig. 3.46

În plus, conform formulelor (6) şi (12), avem, $I(t)=Q'(t)=C\cdot \mathbf{E}'(t)=C\cdot \mathbf{E}_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t$, la orice moment t; notând $I_0=\max I(t)$, rezultă $I_0=C\cdot \mathbf{E}_0 \cdot \omega$. Ţinând cont de formula $\cos\alpha=\sin(\alpha+\frac{\pi}{2})$, rezultă că:

$$I(t)=C\cdot \mathbf{E}_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t+\frac{\pi}{2})=I_0 \sin(\omega t+\frac{\pi}{2}) \qquad (32)$$

<u>Notă:</u> Din nou facem o digresiune matematică. Dacă $\tau>0$ este o constantă şi G este graficul unei funcţii $y=f(t)$, atunci graficul G_1 al funcţiei $y=f(t+\tau)$ este translatatul lui G spre stânga (sau echivalent, devansează G cu τ) - figura 3.47.

Conform formulei (32), se observă că $I(t)$ devansează cu $\frac{\pi}{2}$ tensiunea $\mathbf{E}(t)$, sau că tensiunea la bornele condensatorului

este în urma curentului cu $\frac{\pi}{2}$. În prezenţa condensatorului, se introduce în circuit o anumită rezistenţă, la trecerea curentului electric în regim alternativ; anume, se numeşte **reactanţă capacitivă** raportul X_C dintre amplitudinile tensiunii şi curentului.

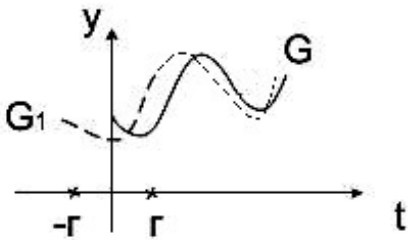


Fig. 3.47

Aşadar,

$$X_C = \frac{1}{I_0} \cdot \mathbf{E}_0 = \frac{1}{C \cdot \omega} \cdot \frac{\mathbf{E}_0}{\mathbf{E}_0} = \frac{1}{C \cdot \omega} \qquad (33)$$

Totodată, între tensiunea efectivă $\mathbf{E}_C$ şi curentul efectiv I_C are loc relaţia $\mathbf{E}_C = X_C\, I_C$ (de tipul legii lui Ohm); X_C se măsoară în ohmi.

Apoi, dacă într-un circuit cu inductor (≡bobină cu inductanţă L) se aplică o tensiune alternativă $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 \sin \omega t$, atunci în bobină apare, prin autoinducţie, conform (27), un curent $I(t)$, astfel încât $\mathbf{E}(t) = L \cdot I'(t)$, deci $I'(t) = \mathbf{E}_0 \cdot \frac{1}{L} \sin \omega t$ şi $I(t) = -\mathbf{E}_0 \cdot \frac{1}{\omega L} \cos \omega t = \mathbf{E}_0 \cdot \frac{1}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$; acum tensiunea

devansează curentul cu $\frac{\pi}{2}$, deci curentul este cu $\frac{\pi}{2}$ în urma tensiunii (figura 3.48).

Se defineşte atunci **reactanţa inductivă**

$$X_L = \frac{\mathbf{E}_0}{(\mathbf{E}_0 / L\omega)} = L \cdot \omega \qquad (34)$$

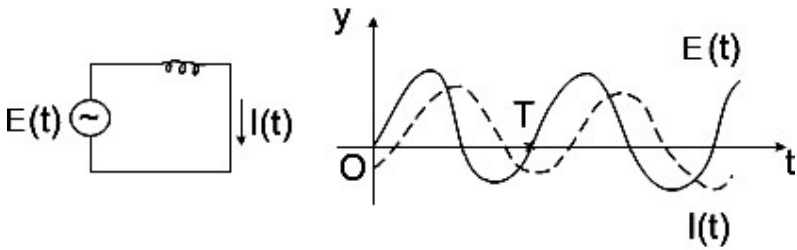


Fig. 3.48

Totodată, tensiunea efectivă $\mathbf{E}_L$ şi curentul efectiv I_L sunt legate prin relaţia $\mathbf{E}_L = X_L \cdot I_L$, tot de tipul legii lui Ohm.

Exemplu: O bobină cu inductanţa L=6 mH este conectată la un circuit alternativ cu 220 V şi 50 Hz. Să se determine reactanţa inductivă şi curentul efectiv.

Soluţie: Deoarece f=50Hz, rezultă $\omega = 2\pi f \cong 314{,}2$rad/s şi conform (34), $X_L = L \cdot \omega \cong 6 \times 10^{-3} \times 314{,}2 \cong 1{,}9\Omega$, deci $I_L = \frac{220}{1{,}9} \cong 116{,}7$ A.

6.3. Circuite RLC în curent alternativ

Considerăm un circuit electric alimentat de o f.e.m. $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 \sin \omega t$, format dintr-un rezistor cu rezistenţa R, un

inductor (≡bobină cu inductanţa L) şi un condensator (cu capacitatea C); R, L, C sunt constante pozitive. Vom studia două situaţii: cele trei elemente sunt conectate a) în serie; b) în paralel (≡derivaţie).

a) Legătura în serie; (figura 3.49)

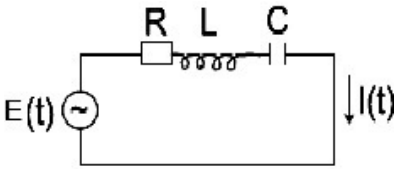


Fig. 3.49

În circuit se stabileşte curentul efectiv I; acesta se menţine în întregul circuit. La bornele rezistorului apare o cădere de tensiune $\mathbf{E}_R = R \cdot I$, iar la bornele bobinei (respectiv condensatorului), avem o cădere de tensiune $\mathbf{E}_L = X_L \cdot I$ (respectiv $\mathbf{E}_C = X_C \cdot I$), unde $X_L = L \cdot \omega$ şi $X_C = \dfrac{1}{\omega \cdot C}$, conform (33) şi (34). Pentru a fixa ideile, presupunem că $X_L > X_C$ (adică efectul inductiv este mai mare decât cel capacitiv); cazul $X_L < X_C$ este similar şi cazul $X_L = X_C$ este separat.

Căderea de tensiune instantanee este suma căderilor de tensiune prin cele trei elemente; dar valorile tensiunilor lor efective nu pot fi adunate, deoarece tensiunile nu sunt în fază. Fără a mai da detalii, se poate arăta că are loc relaţia:

$$\mathbf{U}^2 = \mathbf{E}_R^2 + (\mathbf{E}_L - \mathbf{E}_C)^2 \qquad (35)$$

Definiţie: Câtul $Z = \frac{1}{I} \cdot \mathbf{U}$, (Z>0) se numeşte **impedanţa circuitului**. Împărţind ambii termeni ai relaţiei (35) cu I^2, rezultă:

$$Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2 \qquad (36)$$

Considerăm triunghiul dreptunghic din figura 3.50.

Relaţia (36) este tocmai teorema lui Pitagora. Unghiul φ se numeşte **defazajul** dintre tensiune şi curent în întregul circuit; evident,

$$tg\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} \qquad (37)$$

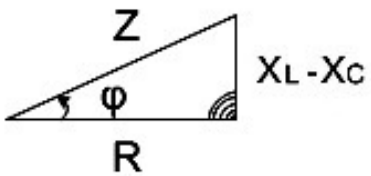


Fig. 3.50

Impedanţa Z se măsoară în ohmi şi apare ca o rezistenţă în circuit, rezistența la trecerea curentului electric alternativ. Relaţia $\mathbf{E}_0 = I \cdot Z$ este numită **legea lui Ohm** a circuitului RLC în serie. În cazul când $X_L < X_C$, defazajul este invers, cu φ negativ.

Dacă $X_L = X_C$, defazajul φ este nul; în acest caz, conform (36) rezultă că $Z=R$ şi aceasta este tocmai valoarea minimă a lui Z, iar $I = \frac{1}{Z} \cdot \mathbf{E}_0$ este maxim (cu valoarea $\frac{1}{R} \cdot \mathbf{E}_0$). Se spune atunci că circuitul se află în **rezonanţă** cu sursa $\mathbf{E}(t)$.

Din relaţia $X_L = X_C$, rezultă $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, deci $\omega^2 LC = 1$ şi $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Apoi, $L = \frac{X_L}{\omega}$ şi $C = \frac{1}{\omega X_C}$, deci $LC = \frac{X_L}{\omega^2 X_C}$; ţinând cont că $f = \frac{\omega}{2\pi}$, rezultă:

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\omega}{2\pi}\sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \qquad (38)$$

pentru frecvenţa f_{rez} a oscilaţiilor tensiunii şi curentului la rezonanţă. Perioada acestor oscilaţii este

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{LC} \qquad (39)$$

Aceasta este numită **formula lui Hertz–Thomson** din Electromagnetism.

Exemple:

1) Un circuit electric este alcătuit dintr-un condensator cu capacitatea C=1,5mF, legat în serie cu o bobină având rezistenţa r=2Ω şi inductanţa L=10mH. Circuitul este alimentat la o tensiune alternativă $\mathbf{E}(t) = 5\sqrt{2}\sin(100\pi t)$. Să se determine frecvenţa curentului alternativ, curentul şi tensiunea efective, precum şi defazajul dintre tensiune şi curent la bornele bobinei.

Soluţie: Avem $\omega = 100\pi$ şi $f = \frac{\omega}{2\pi} = 50\,\text{Hz}$, după care urmează $X_L = L\omega = 10\times10^{-3}\times100\pi \cong 3{,}14\Omega$ şi $\omega C = 1{,}5\times10^{-3}\times100\pi \cong 0{,}47$, $X_C = 2{,}12\Omega$. Conform (36),

$Z^2 = r^2 + (X_L - X_C)^2 \cong 5{,}04$, deci $Z \cong 2{,}24$ Ω. De asemenea, $\mathbf{E}_0 = 5\sqrt{2}$; tensiunea efectivă este U=5V, iar curentul efectiv este $I = \frac{1}{Z} \cdot U \cong 3{,}15$ A. În fine, $tg\varphi = \frac{\omega L}{r} \cong 1{,}57$ şi $\varphi \cong 64^0$.

2) Un circuit de curent alternativ este alimentat la o tensiune de 220V, cu frecvenţa de 50Hz; circuitul este compus dintr-un rezistor cu R=20Ω, legat în serie cu o bobină având rezistenţa nulă şi un condensator. Presupunem că la frecvenţa respectivă, avem X_L=100Ω şi X_C=80Ω. Să se determine curentul efectiv din circuit şi frecvenţa de rezonanţă.

Soluţie: Avem $Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2 = 400 + 400$, deci $Z = 20\sqrt{2}\Omega$. Atunci $I = \frac{1}{Z} \cdot U = \frac{220}{20\sqrt{2}} = 7{,}9$ A. Apoi, conform (38), $f_{rez} = f\sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{80}{100}} \cong 44{,}7$ Hz.

b) legătura în paralel (≡derivaţie), (figura 3.51)

Din nou, la bornele circuitului se aplică tensiunea alternativă $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 \sin \omega t$.

La bornele celor trei elemente de circuit avem aceeaşi tensiune $U = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \mathbf{E}_0$.

În rezistor, curentul este $I_R = \frac{U}{R}$ (în fază cu tensiunea U).

În bobină, $I_L = \dfrac{U}{X_L}$ (defazat cu $\dfrac{\pi}{2}$ în urma tensiunii) şi

în condensator, $I_C = \dfrac{U}{X_C}$ (defazat cu $\dfrac{\pi}{2}$ înaintea tensiunii).

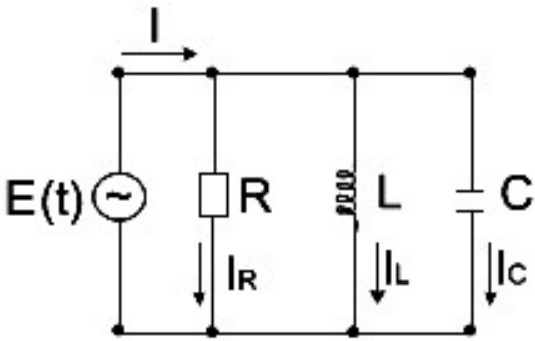


Fig. 3.51

Presupunând că $I_C > I_L$ şi notând cu I curentul efectiv, avem triunghiul dreptunghic al curenţilor din figura 3.52, de unde $I^2 = I_R^2 + (I_C - I_L)^2$, cu unghiul de defazaj φ_1.

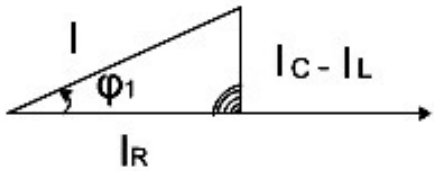


Fig. 3.52

Aşadar, $I^2 = U^2[\dfrac{1}{R^2} + (\dfrac{1}{X_C} - \dfrac{1}{X_L})^2]$. Notând

$Z = [\dfrac{1}{R^2} + (\dfrac{1}{X_C} - \dfrac{1}{X_L})^2]^{\frac{-1}{2}}$ (numită **impedanţa** circuitului,

măsurată în ohmi), rezultă $I^2 = U^2 \cdot Z^{-2}$, deci $I = \frac{U}{Z}$ (legea lui Ohm) şi

$$tg\varphi_1 = \frac{I_C - I_L}{I_R} = R(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}) \qquad (40)$$

Cazul $I_C < I_L$ este similar, iar dacă $I_C = I_L$, adică $X_C = X_L$, avem din nou <u>rezonanţă în circuit</u>, cu frecvenţa $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

<u>Exemplu:</u> Se consideră circuitul electric din figura 3.53, alimentat la tensiunea alternativă $\mathbf{E}(t)=\mathbf{E}_0 \sin\omega t$, cu tensiunea efectivă U=220V, la frecvenţa f=50Hz.

Se dă reactanţa inductivă X_L=20Ω. Să se determine curentul în cele trei poziţii:

a) când comutatorul *k* este deschis;
b) când se află în poziţia **1** şi R=10Ω;
c) în poziţia **2**, iar X_C=9Ω.

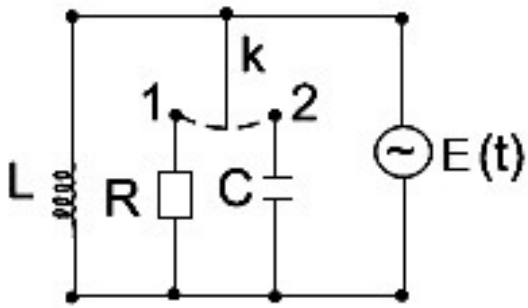


Fig. 3.53

Răspuns:

a) $I = \dfrac{U}{X_L} = 11\,\text{A}$; b) $I = U \cdot \sqrt{\dfrac{1}{R^2} + \dfrac{1}{X_L^2}} = 11\sqrt{5}\,\text{A}$;

c) $I = U\left|\dfrac{1}{X_C} - \dfrac{1}{X_L}\right| = 13{,}44\,\text{A}$.

6.4. Energie şi putere în circuite de curent alternativ

Am văzut că Z reprezintă impedanța circuitului și se măsoară în ohmi (Ω). Mărimea sa inversă, notată cu $Y = \dfrac{1}{Z}$, se numește **admitanță** și se măsoară in **siemens** (Ω^{-1}).

Definiţii: Considerăm un circuit electric de curent alternativ, cu tensiunea efectivă U şi curentul efectiv I.

Puterea aparentă este $P_a = U \cdot I$ (produsul dintre tensiunea şi curentul efective); ea se măsoară în VA (volţi–amperi). **Puterea activă** este $P = U_R \cdot I = R \cdot I^2$ (dacă rezistenţa circuitului este R). **Factorul de putere** este $\cos\varphi = \dfrac{P}{P_a} = \dfrac{R \cdot I}{U}$.

Acesta arată cât din puterea dată de generator poate fi utilizată de consumator. **Puterea reactivă** este $P_r = U \cdot I \cdot \sin\varphi$.

Are loc următoarea relaţie, $P_a^2 = P^2 + P_r^2$, aşa cum se verifică imediat.

Exemple:

1) La bornele unui circuit RLC serie, de curent alternativ, cu R=100Ω, L=1H, C= 6×10^{-5} F, se aplică tensiunea

$\mathbf{E}(t) = 220\sqrt{2} \cdot \sin 100\pi t$ [V]. Să se determine: a) impedanţa circuitului; b) tensiunea şi curentul efective; c) puterea activă şi factorul de putere.

Soluţie:

a) Aşadar, $\omega = 100\pi$ rad/s, deci $Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2$, iar $X_C = \dfrac{1}{\omega C} \cong 53\Omega$ şi $X_L = \omega L = 100\pi \cong 314\Omega$ şi $Z \cong 280\Omega$;

b) Apoi tensiunea efectivă este $U = \dfrac{220\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 220$ V şi curentul efectiv este $I = \dfrac{U}{Z} \cong 0,79$ A;

c) Puterea activă este $P = R \cdot I^2 \cong 62$ VA şi factorul de putere este $\cos\varphi = \dfrac{R \cdot I}{U} = \dfrac{100 \times 0,79}{220} \cong 0,40$.

2) Un circuit RLC paralel cu curent alternativ este alimentat la o tensiune efectivă U=100V şi frecvenţa f=50Hz.

Presupunem că L=1H, puterea activă P=20W şi defazajul $\varphi_1 = \dfrac{\pi}{4}$ (între curentul total şi tensiune). Să se determine R, C şi intensitatea curentului în inductor la orice moment t.

Soluţie: Avem $P = U^2 / R$, deci $R = \dfrac{U^2}{P} = \dfrac{100^2}{20} = 500\Omega$.

Apoi, cu (40), $tg\varphi_1 = R \cdot (\omega C - \dfrac{1}{\omega L})$. Dar $\omega = 2\pi f = 100\pi$ Hz,

deci $1 = 500 \cdot (100\pi \cdot C - \frac{1}{100\pi \cdot 1})$ şi rezultă $C \cong 16\mu F$. În fine:

$$i_L(t) = \frac{U}{X_L}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = \frac{100}{100\pi}\sin(100\pi t - \frac{\pi}{2}) \cong 0,32\sin(314t - \frac{\pi}{2})$$

6.5. Aplicaţii ale circuitelor cu curent alternativ

Atât curentul continuu cât şi cel alternativ au avantaje şi dezavantaje. Curentul continuu alimentează schemele electronice, electromotoarele (la tramvaie sau la locomotive electrice), sistemele de bord ale avioanelor şi automobilelor.

S-au realizat amplificatori de curent continuu şi se dezvoltă cercetări privind coordonarea/cooperarea între cele două tipuri de curent electric.

Electricitatea în curent continuu se conservă în baterii de acumulatoare un timp îndelungat, iar electricitatea în curent alternativ trebuie consumată în momentul producerii, deoarece o posibilă stocare s-ar putea face numai în lacurile de acumulare care la un moment dat, prin căderile de apă pot acționa turbine generatoare de curent.

La sfârşitul secolului al XIX-lea, a existat o competiţie dură între promotorii curentului continuu (reprezentaţi prin inventatorul american Edison) şi cei ai curentului alternativ (prin sârbo–istro–românul N. Tesla). În radiotehnică şi televiziune sau în calculatoare se folosesc de regulă semnale electrice de curent alternativ, de diverse forme şi frecvenţe. De exemplu, un emiţător radio transformă un curent de înaltă frecvenţă în unde

radio, iar microfonul transformă sunetul în curent alternativ de frecvenţă joasă, care coincide cu frecvenţa sunetului; un difuzor (megafon) transformă curentul de frecvenţa sunetului în sunet.

Însă la electroliză, curentul continuu nu poate fi înlocuit.

În general, în tehnica actuală sunt necesare ambele forme de curent electric şi prin redresoare se realizează treceri de la curent alternativ la curent continuu. De la tensiune continuă la cea alternativă se trece prin inversoare.

Una din insuficienţele curentului alternativ este aceea că trebuie proiectat conductorul/cablul prin care circulă curentul pentru valoarea maximă a curentului; în plus, la frecvenţe mari, sarcinile electrice nu se distribuie uniform pe întreaga secţiune a conductorului şi apar pierderi de energie datorate câmpului magnetic inerent. Aceste insuficienţe nu se întâlnesc la curentul continuu. Şi totuşi …

Generatoarele şi motoarele de curent alternativ au o construcţie mai simplă şi o întreţinere mai ieftină decât cele de curent continuu. Cea mai importantă aplicaţie a curentului alternativ o reprezintă **transportul energiei electrice** de la producător (≡generator), de regulă marile centrale hidro-, termo- sau nuclear-electrice, la consumator, ţinând cont că pierderile prin liniile de transmisie şi distribuţie la distanţă sunt mai mici la tensiuni mai înalte. Iată un exemplu edificator:

<u>Exemplu:</u> Presupunem că se transmite puterea de 55kW de la o centrală la un consumator tipic, la tensiunea U=220V. Presupunem de asemenea că rezistenţa liniei de transmisie este

R=0,4Ω. Atunci curentul este $I = \frac{P}{U} = \frac{55 \times 10^3}{220} = 250$ A şi căldura degajată este $Q = I^2 \cdot R = 250^2 \times 0{,}4 = 25$ kW.

Aşadar, $\frac{25}{55} \times 100\% = 45\%$ din putere se disipă (≡pierde) sub formă de căldură!

Dar dacă pe aceeaşi linie de transport s-ar transmite curentul cu tensiunea U=2200V (deci de 10 ori mai mare!), atunci curentul în reţea ar fi $I = \frac{55 \times 10^3}{2200} = 25$ A şi pierderile ar fi $Q = 25^2 \times 0{,}4 = 250$ W, deci de 100 de ori mai mici!

Aşadar, tensiunile mari conduc la intensităţi mai scăzute (pentru aceeaşi putere la generare) şi, implicit, la pierderi mai mici sub formă de căldură disipată (necontrolat, adică pierdută în mediul ambiant). Pe o linie de transport cu rezistenţa R şi curentul I, căldura generată este $R \cdot I^2$ şi, pe de altă parte, puterea furnizată pe o linie cu diferenţa de potenţial U este $I \cdot U$.

De aceea se impune alegerea celei mai favorabile tensiuni, cu un curent mai slab, pentru a reduce pierderile de căldură. Liniile de înaltă tensiune au fire cu o arie rezonabilă a secţiunii; dacă energia ar fi fost transportată la tensiune joasă, pe o aceeaşi distanţă, ar fi fost necesar un consum mare de cupru.

În practica actuală, liniile de înaltă tensiune, întâlnite în toată ţara, folosesc tensiuni de sute de kilovolţi.

Transformatorul

Ideea de bază a transformatoarelor este aceea de a mări sau micşora tensiunile alternative şi ea a aparţinut deopotrivă lui Edison şi Tesla, după 1880.

Un transformator este alcătuit din două bobine având acelaşi câmp magnetic în interior, dar nelegate electric între ele. Bobinele au N_1 şi, respectiv, N_2 spire, înfăşurate pe braţele unui miez de fier (figura 3.54).

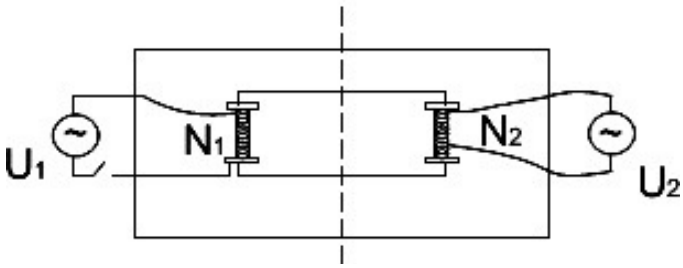


Fig. 3.54

Bobina primară (numită „de câmp”) având N_1 spire este conectată la o sursă de tensiune alternativă U_1. Un curent variabil produce un flux magnetic variabil care traversează înfăşurarea celeilalte bobine–secundare („de inducţie”), având N_2 spire, unde apare o altă tensiune alternativă U_2, în funcţie de numărul de spire. Miezul de fier întăreşte câmpul magnetic şi realizează cuplajul între cele două bobine.

Se poate demonstra relaţia fundamentală $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$, deci tensiunea din secundar este $U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1$.

Notă: Un transformator nu funcţionează cu tensiune continuă, deoarece aceasta nu produce un câmp magnetic variabil, necesar pentru a induce curent în cealaltă bobină.

Exemple: 1) Dacă N_1=100 şi N_2=10, atunci tensiunea este micşorată de 10 ori.

2) Presupunem că înfăşurarea primară are 100 de spire şi este conectată la o linie de curent alternativ cu U_1=120V. Tensiunea la bornele înfăşurării secundare, având de exemplu 1500 de spire, va fi $U_2 = \frac{1500}{100} 120 = 1800$ V.

Transmiterea energiei electrice la distanţe mari, de la generatorul G la utilizator U_t, cu pierderi rezonabile, necesită schema din fig. 3.55, care foloseşte două transformatoare T_1, T_2.

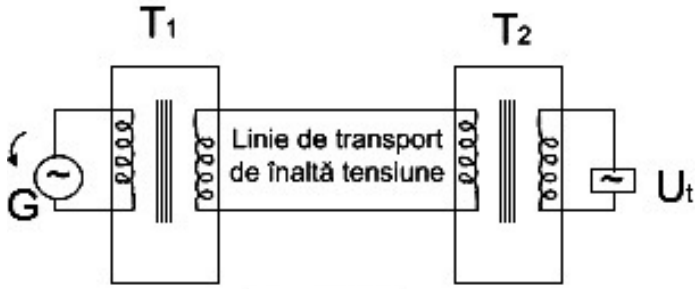


Fig. 3.55

Generatorul G de curent alternativ transformă energia mecanică în energie electrică; transformarea se realizează prin utilizare de energie mecanică, rotind un cadru cu înfăşurare metalică între polii unui magnet permanent sau ai unui electromagnet (ca în figura 3.42 sau 3.43). Tensiunea produsă de G este transformată de transformatorul T_1 în înaltă tensiune (zeci

sau sute de kV), transportată la distanţă în apropierea utilizatorului industrial sau casnic. Dar, înainte de a ajunge la utilizator, ea este transformată în tensiune mai joasă, de 110V sau 220V de transformatorul T_2.

Ar fi salutar să se realizeze şi transportul energiei electrice în curent continuu, însă tehnologia nu este încă pregătită.

Notă: Transformatoarele sunt utilizate şi pentru a îmbunătăţi securitatea electrică a persoanelor care folosesc aparatură. Deoarece înfăşurările primară şi secundară nu se află direct în contact, în cazul când o persoană vine în contact simultan cu o sârmă de la secundar şi cu pământul, persoana pune sârma în contact cu pământul (="la pământ"), fără ca vreo tensiune mare să o traverseze. În acest mod, se reduc riscurile tensiunilor mari.

Nu întâmplător, pacienţii conectaţi la aparate de tip EKG, ECG, RMN, stimulatoare cardiace etc. necesită transformatoare corespunzătoare.

Multe aparate electrice şi electronice folosesc transformatoare ale căror înfăşurări secundare le oferă tensiunea necesară de funcționare, mult mai mică decât cea generată de rețeaua de alimentare (220V). În felul acesta corpul uman nu poate fi supus decât acestor tensiuni mici, care nu sunt periculoase, în cazul unui accident.

Motoare electrice

Pentru a fixa ideile, reamintim următoarea

Definiţie: Se numeşte **motor electric** (≡**electromotor**) un dispozitiv care transformă energia electrică în energie mecanică.

Am văzut că generatoarele electrice realizează transformarea inversă. După tipul curentului electric, motoarele sunt de curent continuu şi de curent alternativ.

Ca o curiozitate, să enumerăm câte motoare sau motoraşe electrice avem în casă... Avem aspirator, maşină de spălat rufe, râşniţă, ventilator, aparat cu microunde, sonerie, calculator (la discul hard, la imprimantă şi la ventilatorul de răcire), ascensor, maşină de tăiat iarbă etc., fără a vorbi de pompe, drujbe electrice, electromagneţi, electrofiltre sau alte diverse acţionări.

În toate cazurile menţionate, se introduce curent la un capăt al motorului şi există un ax cu conductor metalic la celălalt capăt, care se roteşte şi transferă putere altor configuraţii.

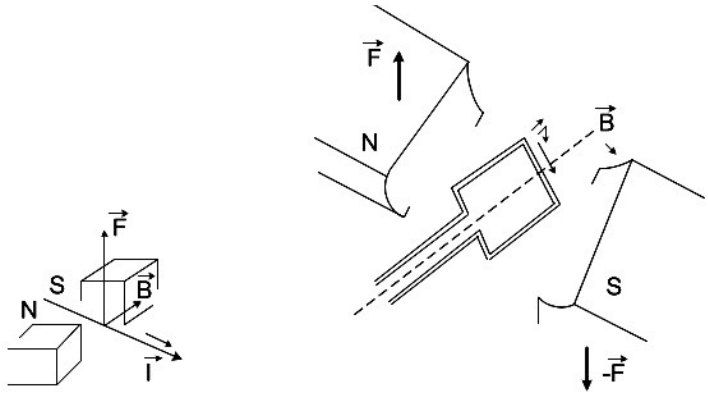
Reamintim una din modalităţile tipice prin care curentul electric generează mişcare mecanică. Contactăm capetele unei sârme metalice la polii unei baterii, după ce sârma a fost îndoită, formând un cadru/contur plasat între polii N-S ai unui magnet–potcoavă permanent (figura 3.56).

Majoritatea motoarelor electrice funcţionează tocmai pe baza forţelor electromagnetice formând un cuplu ce roteşte bobina. Indiferent de tipul motoarelor electrice, ele conţin un inductor (sursa câmpului magnetic) şi un rotor care se învârte atunci când pe înfăşurarea lui apare un curent electric.

Componentele principale sunt:

- **statorul** (un echipament fix, incluzând bornele de alimentare şi un magnet permanent fixat pe carcasa motorului);

- **rotorul** (echipament mobil, având un ax şi mai multe bobine înfăşurate pe un miez de fier; rotorul este cel care livrează puterea mecanică, de exemplu, printr-o maşină-unealtă: strung, freză etc.);



a) Curentul electric $\vec{I}$ aflat într-un câmp magnetic $\vec{B}$ exercită o forţă de tip Lorentz $\vec{F}$.

b) Curentul purtător de curent $\vec{I}$ are două laturi perpendiculare pe câmpul magnetic $\vec{B}$, creând un cuplu de forţe $\vec{F}$, $-\vec{F}$ care roteşte bobina.

Fig. 3.56

- **colectorul** (dispozitiv situat pe ax, având mai multe lamele izolate una de alta şi învârtindu-se odată cu bobina. În timpul rotaţiei, lamelele colectorului au alternativ contact cu nişte perii colectoare conectate la sursa de tensiune) figura 3.57.

Primul motor cu curent continuu a fost realizat de Z. Gramme (în jurul lui 1870).

Motoarele cu curent alternativ funcţionează pe baza principiului câmpului magnetic rotitor, stabilit de N. Tesla în 1882; el a construit primul rotor de inducţie bifazat, creând cu

această ocazie primul sistem de transmisie eficientă, la distanţă, a energiei electrice.

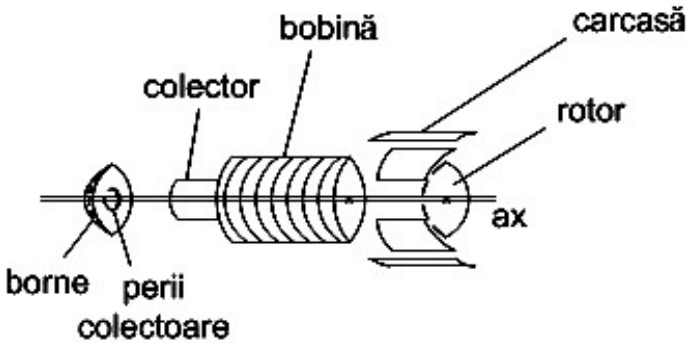


Fig. 3.57

CAPITOLUL 4 - FENOMENE OPTICE

Introducere

Optica („optikos”≡care se referă la vedere, în greceşte) studiază natura luminii şi fenomenele de emisie, propagare în diverse medii, precum şi interacţiile luminii cu diverse substanţe. În acest capitol, se prezintă cu precădere **Optica geometrică**, adică studiul imaginilor obiectelor prin diverse medii transparente şi al instrumentelor optice – oglinzi, lentile, microscoape, telescoape etc. Ulterior, ne vom referi şi la elemente de **Optică ondulatorie**.

Misterul luminii şi al vederii a avut un rol central în religie, artă, ştiinţă şi nu putem uita că peste 80% din informaţie o căpătăm pe cale vizuală. Mult timp s-a crezut fals că razele de lumină sunt o emanaţie a ochilor noştri. Acum ştim că lumina este o radiaţie electromagnetică având lungimi de undă între 0,4μm şi 0,8μm şi că are viteza $c \cong 3x10^8$ m/s (în vid).

În medii omogene, lumina se propagă în linie dreaptă; „raza de lumină” este un concept abstract, o idealizare care permite explicarea fenomenelor de reflexie, refracţie, umbre, formare a imaginilor etc.

Istoricul opticii începe în urmă cu 4000 de ani, când au fost descoperite oglinzile. Mai tîrziu, tot în Antichitate, Arhimede şi Heron au stabilit legile reflexiei şi au fost descoperite lentilele. În jurul lui 1600, olandezul Snell a stabilit legile refracţiei, după ce Kepler a explicat corect cum lucrează

ochiul uman şi cum se formează imaginile pe retină. În secolul al XVII-lea, danezii Jannsen, tată şi fiu, au realizat primul microscop, după ce Galilei inventase luneta, iar Newton stabilise natura duală a luminii şi explicase culorile. În secolul al XIX-lea, Maxwell a realizat prima fotografie color şi, mai ales, a stabilit proprietăţile electromagnetice ale luminii, deschizând împreună cu Hertz era **Opticii electronice**, ca parte a opticii care se ocupă cu mişcarea electronilor şi fotonilor în câmp electromagnetic. În secolul al XX-lea, Einstein a arătat că lumina este un flux de fotoni, cuante de energie, prezicând descoperirea laserilor.

§ 1. LEGILE REFLEXIEI ŞI REFRACŢIEI

După discuţii care au durat peste 300 de ani, fizicienii au adoptat natura duală ondulatorie–corpusculară a luminii vizibile, ca **undă** pe parcurs şi **particule** la plecare şi sosire; în acest mod, s-au putut explica fenomenele de **reflexie** (≡revenire în mediu), **refracţie** (≡deviere a razelor de lumină la trecerea prin suprafaţa de separaţie între două medii omogene), **difracţie** (≡devierea razelor luminoase în jurul obiectelor), **absorbţia** luminii, culorile etc. În cele ce urmează, punctele – obiect sunt un fel de „pete”, iar dreptele, „benzi” infinitezimale.

1.1. Problema fundamentală a opticii geometrice

Definiţie: **Indicele de refracţie** al unui mediu transparent (≡ neopac) şi omogen, este

$$n = \frac{c}{v}, n \geq 1, \qquad (1)$$

unde c=viteza luminii în vid $c \cong 3x10^8$ m/s şi v=viteza luminii în mediul respectiv.

Exemple: În vid, n=1 şi în aer avem $n \cong 1,01$; în apă, n=1,33, în sticlă, n=1,55, iar în diamant, n=2,42.

Principiile opticii geometrice

Fără a intra în detalii, acestea sunt următoarele:

- în medii omogene, lumina se propagă în linie dreaptă;

- razele de lumină care trec prin acelaşi punct sunt independente între ele;

- în lungul oricărei raze de lumină nu există un sens de propagare;

- pentru orice două puncte din spaţiu prin care trece o rază de lumină, aceasta alege drumul timpului minim de parcurs dintre puncte („principiul lui Fermat”);

- orice rază incidentă de lumină căzută pe o suprafaţă are simultan o rază reflectată şi una refractată, toate trei fiind asimilate cu semidrepte având un capăt comun.

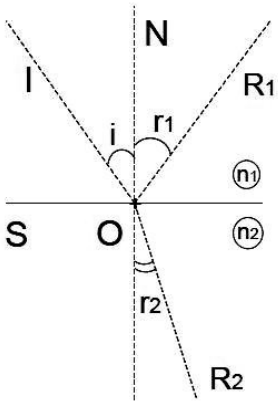


Fig. 4.1

Să considerăm o suprafaţă (plană) S de separaţie a două medii şi fie N dreapta normală la S într-un punct oarecare fixat $O \in S$ (figura 4.1). Fie I o rază de lumină monocromă incidentă în O, R_1 raza reflectată şi R_2 raza refractată.

LEGEA REFLEXIEI: „Semidreptele I, N, R_1 sunt coplanare (situate în acelaşi plan perpendicular pe S) şi unghiul de incidenţă i=măs$(\widehat{I,N})$ este congruent (≡egal) cu unghiul de reflexie r_1=măs$(\widehat{I,R_1})$. Aşadar,

$$r_1 \equiv i \qquad (2)$$

LEGEA REFRACŢIEI: „Semidreptele I, N, R_2 sunt coplanare şi în plus,

$$\frac{\sin i}{\sin r_2} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ (relaţia lui Snell)}, \qquad (3)$$

unde n_1 (respectiv n_2) sunt indicii de refracţie ai celor două medii omogene (de incidenţă şi, respectiv, de refracţie)”.

Nu demonstrăm aceste legi, deplin confirmate experimental.

COROLAR: „Cu notaţii transparente, la trecerea de la aer la un mediu cu indicele de refracţie n, are loc relaţia $\sin i = n \cdot \sin r_2$”.

Problema fundamentală a opticii geometrice este cea a formării imaginilor obiectelor mărite sau micşorate, prin instrumente optice adecvate.

1.2. Dioptru optic şi formarea imaginilor punctelor–obiect

Definiţie: Se numeşte **dioptru** (optic) suprafaţa de separaţie a două medii transparente, având indici de refracţie diferiţi.

Exemple: Suprafaţa apei este un dioptru plan (de separaţie între aer şi apă). De asemenea, suprafaţa unei lentile este un dioptru realizat din două suprafețe sferice (separând aerul şi sticla).

În practică, se folosesc îndeosebi dioptri sferici (sau mai corect, nişte calote cvasi-sferice), ca în figura 4.2, unde C este centrul sferei de provenienţă, V – vârful dioptrului (≡polul calotei) şi dreapta CV este **axa optică** a dioptrului. Dacă A_1 este un punct (zis **punct–obiect**), atunci orice rază incidentă, A_1B vecină cu axa optică, are o rază refractată BA_2 (A_2 fiind **punctul–imagine** reală a lui A_1 prin dioptru). Stabilim în continuare legătura matematică între poziţiile punctelor A_1 şi A_2.

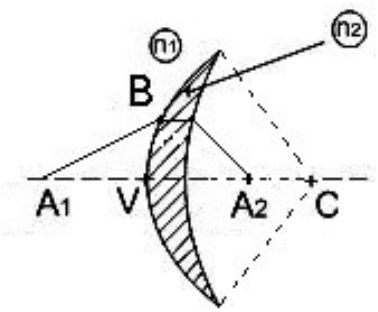


Fig. 4.2

Să considerăm un dioptru (D) cu centrul C, raza R şi vârful V; asimilăm axa optică cu axa orizontală $x'x$. Fie A_1 un

punct – obiect, A_1B o rază incidentă şi BA_2 raza refractată; ducem $BB' \perp A_1A_2$ şi considerăm sistemul ortonormal de axe x$B'y$ (figura 4.3).

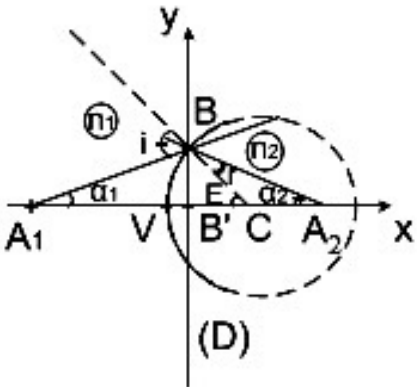


Fig. 4.3

Notăm cu n_1, n_2 indicii de refracţie ai mediilor separate de dioptru ($n_1 < n_2$). Atunci $A_1(x_1,0)$ şi $A_2(x_2,0)$, deci $x_1<0$, $x_2>0$ şi $B'(0,0)$. Normala la dioptru este CB (raza CB a sferei fiind perpendiculară pe planul tangent la sferă în punctul B). Am notat cu i şi r unghiurile de incidenţă şi refracţie; presupunem de asemenea că unghiurile α_1, α_2, ε au măsuri mici, sub 6° (atunci cosinusurile lor au valori de circa 0,999 şi se pot aproxima cu 1).

Conform legii lui Snell, avem $n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$, deci

$n_1 \cdot \sin(\varepsilon + \alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\varepsilon - \alpha_2)$, adică

$$n_1 \cdot (\sin\varepsilon \cos\alpha_1 + \sin\alpha_1 \cos\varepsilon) = n_2 \cdot (\sin\varepsilon \cos\alpha_2 - \sin\alpha_2 \cos\varepsilon).$$

Dar $\cos\alpha_1 \cong 1$, $\sin\alpha_1 \cong \operatorname{tg}\alpha_1$, $\cos\varepsilon \cong 1$, $\cos\alpha_2 \cong 1$, $\sin\alpha_2 \cong \operatorname{tg}\alpha_2$

deci $n_1 \cdot (\sin\varepsilon + \operatorname{tg}\ \alpha_1) \cong n_2 \cdot (\sin\varepsilon - \operatorname{tg}\ \alpha_2)$.

Aşadar, $n_1(\frac{BB'}{BC}+\frac{BB'}{B'A_1}) \cong n_2(\frac{BB'}{BC}-\frac{BB'}{B'A_2})$ şi împărţind cu BB', rezultă relaţia:

$$n_1(\frac{1}{R}-\frac{1}{x_1}) \cong n_2(\frac{1}{R}-\frac{1}{x_2}) \qquad (4)$$

numită **relaţia lui Gauss – Abbe**.

Iată câteva consecinţe directe:

- Pentru $R \to \infty$ se obţine dioptrul plan; rezultă $\frac{1}{R} \to 0$.

Atunci are loc relaţia:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (5)$$

<u>Exemplu:</u> Presupunem că adâncimea unui bazin de apă este h=2 m. Determinăm adâncimea aparentă h' la care se vede o piatră A_1 situată pe fundul apei (figura 4.4).

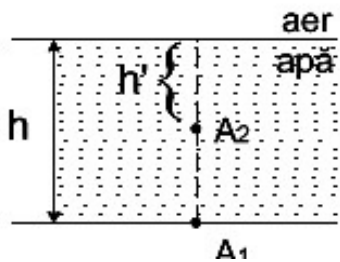


Fig. 4.4

<u>Soluţie:</u> Imaginea va fi A_2. Aplicând relaţia (5) pentru dioptru plan apă/aer, rezultă $\frac{h}{h'} = \frac{n}{n'} = \frac{1,33}{1}$, deci $h'=\frac{h}{1,33}$=1,5 m.

- Dacă A_1 tinde (≡este aruncat) la infinit, adică raza incidentă A_1B este paralelă cu axa dioptrului, atunci $\frac{1}{x_1} \to 0$ şi rezultă $\frac{n_1}{R} = n_2(\frac{x_2 - R}{R \cdot x_2})$, deci $x_2 = \frac{R \cdot n_2}{n_2 - n_1}$ (renunţăm la semnul ≅). În acest caz, punctul–imagine A_2 se notează F_2 şi se numeşte **focarul–imagine** şi în plus, abscisa x_2 se notează cu f_2 şi se numeşte **distanţa focală-imagine**. Se obţine situaţia din figura 4.5, a) şi pentru toate razele incidente paralele cu axa optică, razele refractate corespunzătoare trec prin focarul F_2. În plus, are loc formula

$$f_2 = \frac{R \cdot n_2}{n_2 - n_1} \qquad (6)$$

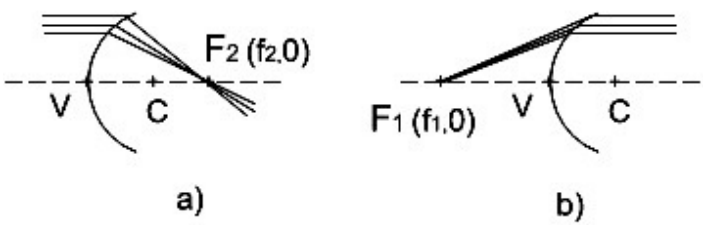


Fig. 4.5

<u>Exemplu:</u> Să se determine distanţa focală imagine pentru un dioptru sferic aer – apă cu raza R = 10 cm.

<u>Răspuns:</u> Aici n_1=1,01; n_2=1,33 şi $f_2 = \frac{10 \cdot 1,33}{1,32} \cong 10,08$ cm.

- Dacă A_2 tinde la infinit, atunci $\frac{1}{x_2} \to 0$ şi relaţia (4)

devine $n_1(\frac{x_1 - R}{R \cdot x_1}) = \frac{n_2}{R}$, deci $x_1 = -\frac{R \cdot n_1}{n_2 - n_1}$. În acest caz, punctul–obiect A_1 se notează F_1 şi se numeşte **focarul–obiect** F_1 şi în loc de x_1 se scrie f_1 ($-f_1$ fiind **distanţa focală obiect**). Aşadar,

$$f_1 = -\frac{R \cdot n_1}{n_2 - n_1}. \qquad (7)$$

În acest caz, avem situaţia din figura 4.5, b).

1.3. Formarea imaginilor unor obiecte printr-un dioptru sferic

Să considerăm un dioptru sferic (D) cu raza R şi centrul C; dioptrul separă mediile cu indicii de refracţie n_1, n_2 ($n_1<n_2$). Fie F_2 focarul–imagine al dioptrului, a cărui poziţie, conform (6), depinde numai de R, n_1, n_2.

Considerăm un obiect liniar A_1B_1 perpendicular pe axa optică, asimilat cu un „băţ" vertical de lungime y_1; figura 4.6.

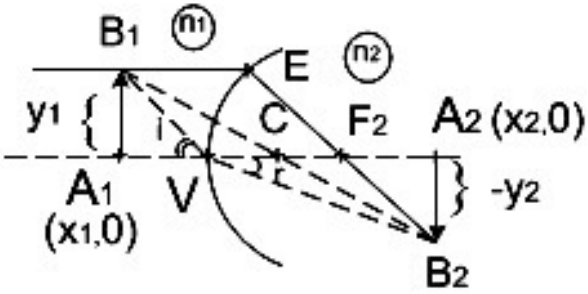


Fig. 4.6

Raza paralelă prin B_1 la axa optică intersectează (D) în punctul E. Dreptele EF_2 şi B_1C se intersectează în punctul B_2.

Alegem un sistem cartezian de coordonate xVy, cu originea în V. Atunci imaginea obiectului A_1B_1 este „băţul răsturnat” A_2B_2 (perpendicular pe axa optică). Lungimea acestuia este $-y_2$ (unde y_2 este ordonata, negativă, a punctului B_2). Coordonatele corespunzătoare sunt $B_1(x_1, y_1)$ $B_2(x_2, y_2)$. Raportul $\beta = \frac{A_2B_2}{A_1B_1}$ dintre dimensiunile imaginii şi obiectului iniţial se numeşte **mărirea liniară prin dioptru**. Pentru raza incidentă B_1V, raza refractată este VB_2 şi conform legii lui Snell, $n_1 \sin i = n_2 \sin r$. Dar pentru i şi r „mici”, sin $i \cong$ tg $i = \frac{A_1B}{A_1V}$ şi sin $r \cong$ tg $r = \frac{A_2B_2}{VA_2}$. Atunci $n_1 \cdot \frac{y_1}{-x_1} = n_2 \cdot \frac{-y_2}{x_2}$ şi ca atare,

$$\beta = \frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{-y_2}{y_1} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{x_2}{-x_1} \cong \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{VA_2}{VA_1}, \text{ deci}$$

$$\frac{y_2}{y_1} = -\frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{x_2}{x_1} \qquad (8)$$

<u>Notă:</u> Pentru a construi imaginea unui obiect liniar vertical de tipul A_1B_1 au fost suficiente două raze incidente (B_1E şi B_1V), alese din infinitatea de raze incidente.

Pentru a construi imaginea altor obiecte mai complexe – triunghiuri, cercuri, discuri pline etc.- se consideră imaginea unor puncte semnificative ale originalului, dar nu mai pot fi date alte detalii.

1.4. Reflexia totală

Există situaţii când lumina nu poate trece prin două substanţe transparente. O astfel de situaţie se întâlneşte la unghiuri de incidenţă mari, atunci când lumina trece, de la un mediu, la altul cu indicele de refracţie mai mic. (De exemplu, apă/aer sau sticlă/apă). La unghiuri mici de incidenţă, au loc atât fenomene de reflexie cât şi de refracţie.

Să considerăm un vas mai larg, plin cu lichid având indicele de refracţie *n* şi la fundul vasului aşezăm un beculeţ aprins *B* (figura 4.7).

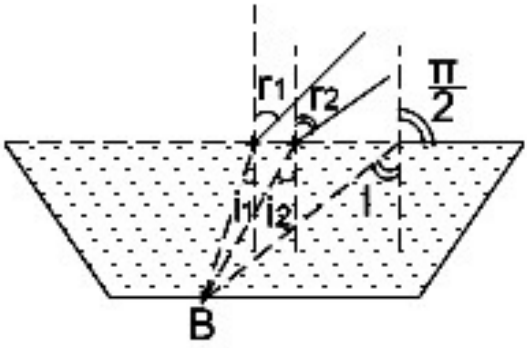


Fig. 4.7

Mărind unghiul de incidenţă al razelor de lumină care pornesc din B ($i_1<i_2<...$), se ajunge la un unghi de incidenţă limită $l = i_N$ pentru care unghiul de refracţie este $\frac{\pi}{2}$. Aplicând legea lui Snell (3), rezultă $\frac{\sin l}{\sin\frac{\pi}{2}} \cong \frac{1}{n}$ şi se determină *l*.

Acest fenomen se numeşte **reflexia totală**. Pentru unghiuri de incidenţă mai mari decât **unghiul critic** l, raza refractată nu mai trece în aer, rămânând în lichid.

Exemplu: Pentru trecerea de la apă la aer, $\sin l \cong \frac{1}{1,33}$ şi $l \cong 54^{o}$.

Notă: Fenomenul de reflexie totală este utilizat la fibrele optice, unde lumina trece prin conducte (conductori de sticlă sau de plastic). O altă aplicaţie se obţine considerând o prismă dreaptă de sticlă ca în figura 4.8, care se comportă ca o oglindă; razele având unghiul de incidenţă (45^0) mai mare decât l (care este de 42^0) sunt reflectate total.

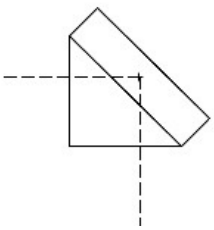


Fig. 4.8

§2. OGLINZI

Definiţie: **Oglinzile** sunt suprafeţe opace şi lustruite, care reflectă majoritatea razelor incidente.

Exemple: Oglinzile metalice reflectă circa 90% din razele de lumină. Aluminiul şi argintul au o mare reflectivitate (fiind folosite în industrie pentru diminuarea efectelor radiaţiilor termice). Celebrele „oglinzi veneţiene” au tocmai o peliculă de

argint. După tipul suprafeţei oglinzile sunt clasificate în: plane, sferice, cilindrice, parabolice etc.

2.1. Oglinzi plane

Dacă privim perpendicular (≡normal) spre o oglindă plană şi pe frunte scrie OMUL, pare că lumina captată de ochii noştri provine din spatele oglinzii şi pe frunte scrie LUMO („Sus şi Jos” nu sunt schimbate).

Să considerăm o oglindă plană *S* (figura 4.9) şi ochiul (punctual) al unui observator.

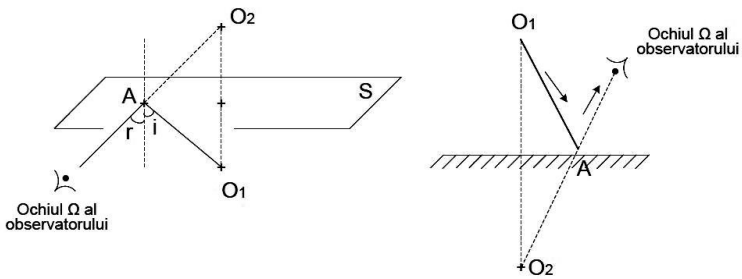


Fig. 4.9

Dacă O_1 este obiectul (tot punctual) observat, se consideră simetricul O_2 al lui O_1 faţă de planul *S*. Prin definiţie, O_2 este **imaginea** lui O_1. Linia care uneşte O_2 cu ochiul Ω intersectează planul *S* în punctul *A*. Dintre toate punctele *M* din planul *S*, cel pentru care drumul $O_1M\Omega$ are lungimea minimă este tocmai *A*. Acest fapt evident este atribuit lui Heron.

Observatorul Ω „vede” imaginea obiectului O_1 ca şi când acesta s-ar afla în spatele oglinzii. (Atunci când imaginea unui

obiect este dată nu de razele reale, ci de prelungirile lor, se spune că imaginea este **virtuală**).

Notă: Obiectele macroscopice au o infinitate de puncte. S-au ales: un sigur punct reprezentativ O_1 şi o singură rază incidentă. Pentru obiecte mai mari, se consideră puncte semnificative ale lor şi se reconstituie imaginea globală din imaginile acestora.

Exemplu: O persoană având înălţimea I se află în faţa unei oglinzi plane verticale S. Care trebuie să fie înălţimea acelei oglinzi astfel încât persoana să se vadă în oglindă în întregime?

Soluţie: Fie Ω ochiul (punctual) al persoanei şi persoana-asimilată cu segmentul vertical CP paralel cu oglinda (C≡capul şi P≡picioarele); figura 4.10.

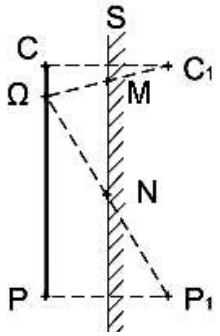


Fig. 4.10

Fie C_1 (respectiv P_1) imaginea virtuală a capului (respectiv picioarelor) persoanei. Atunci imaginea (virtuală) a persoanei este C_1P_1. Având ochiul în Ω, persoana trebuie să „vadă” punctele C_1, P_1. Notând cu M şi N intersecţiile dreptelor ΩC_1 şi ΩP_1 cu planul S, dimensiunea minimă a oglinzii trebuie să fie cât lungimea MN. Aplicând proprietatea liniei de mijloc în

triunghiul ΩC_1P_1, rezultă că $MN = \frac{C_1P_1}{2} = \frac{CP}{2} = \frac{I}{2}$. Aşadar, înălţimea oglinzii trebuie să fie $\geq \frac{I}{2}$.

2.2. Oglinzi sferice

Orice sferă are o faţă interioară şi una exterioară. Oglinzile sferice care au partea reflectantă în interiorul (respectiv exteriorul) sferei se numesc **concave** (respectiv **convexe**).

Exemplu: În figura 4.11,a) este redată o oglindă concavă cu centrul *C* şi vârful *V* şi în figura 4.11,b) o oglindă convexă.

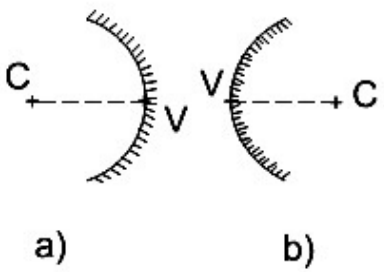


Fig. 4.11

Notă: În Geometrie, o mulţime plană *K* se numeşte convexă dacă pentru orice două puncte *A*, *B*$\in$*K,* segmentul [*A*, *B*] este conţinut în *K*. De exemplu, semiplanele sau interioarele de discuri sunt mulţimi convexe. Terminologia adoptată în Optică este oarecum în contradicţie cu cea din Geometrie.

Înainte de a studia formarea imaginilor în oglinzi sferice, sunt necesare câteva pregătiri. Să considerăm un reper ortonormal xCy şi cercul unitate cu centrul în C; figura 4.12.

Introducând coordonate, avem $C(0, 0)$ şi $V(1, 0)$.

Fie F mijlocul razei CV, deci $F(\frac{1}{2}, 0)$.

Considerăm un punct- obiect, prin care ducem paralela A_1A' la axa Cx şi fie A_2 punctul de intersecţie a dreptelor $A'F$ şi A_1C. Dacă u=măs$(\widehat{VCA'})$, atunci $A'(\cos u, \sin u)$ şi $A'F^2$= $(\cos u - \frac{1}{2})^2 + (\sin u - 0)^2 = 1 - \cos u + \frac{1}{4}$. Pentru valori „mici" ale lui u (sub 10^0) avem $\cos u \cong 1$ şi ca atare $A'F \cong \frac{1}{2} = CF$. Aşadar, triunghiul CFA' este isoscel şi rezultă că $A'C$ este bisectoarea unghiului $A_1A'F$.

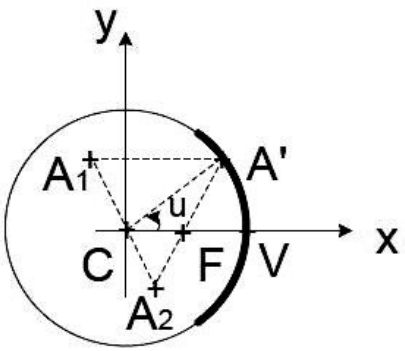


Fig. 4.12

În figura 4.12, am întărit un arc al cercului, sugerând o oglindă concavă; CV se numeşte **axa optică** a acestei oglinzi. Dacă A_1 este un punct – obiect, atunci A_1A' este o rază de lumină

incidentă care se reflectă prin focarul *F*. (**Focarul** este, prin definiție, punctul prin care trec toate razele reflectate ale razelor incidente paralele cu axa optică). Iar $A_2 = A'F \cap A_1C$ este numit **punct – imagine**.

2.3. Oglinzi sferice concave

Se consideră o oglindă sferică concavă *S* cu centrul *C*, raza *R* şi vârful *V* (figura 4.13).

Se consideră sistemul ortonormal de axe *xVy*; partea reflectantă a oglinzii este situată în cadranele II şi III. Fie A_1 un punct – obiect oarecare. Raza incidentă A_1A' este paralelă cu axa optică şi raza reflectată corespunzătoare este $A'F$, unde *F* este mijlocul segmentului *CV*. De regulă, razele reale se reprezintă prin linii continue. Figurile nu respectă întotdeauna această regulă.

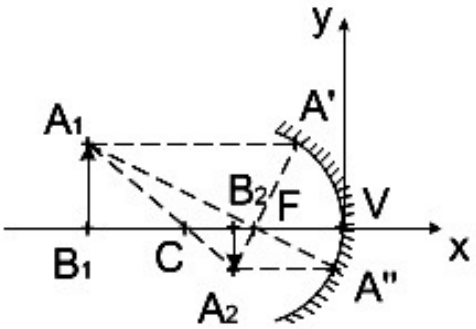


Fig. 4.13

Apoi raza incidentă A_1FA'' se reflectă în raza A_2A'', paralelă cu axa optică. În fine, raza incidentă A_1C se întoarce pe aceeaşi direcţie, după atingerea oglinzii. Punctul $A_2 = A'F \cap A_1C$ este

imaginea lui A_1. Să considerăm un obiect A_1B_1 (asimilat cu un „băţ vertical cu săgeata în sus”). Imaginea lui este A_2B_2 („băţ cu săgeata în jos”), deci imaginea este răsturnată şi micşorată.

Introducem acum coordonate ca în figura 4.13:

$$A_1(-x_1, y_1), A_2(-x_2, -y_2), F(-f, 0) \equiv (-\frac{R}{2}, 0).$$

Deoarece punctele sunt situate în cadranele II şi III ale reperului xVy, rezultă că numerele reale x_1, y_1, x_2, y_2, f sunt toate pozitive.

Stabilim acum **formulele oglinzii concave** (adică legăturile algebrice între aceste coordonate). Triunghiurile $A_2A''F$ şi $A_1A'F$ fiind asemenea, raportul de asemănare este egal cu raportul înălţimilor omoloage, deci $\frac{x_2}{x_1} \cong \frac{A_2A''}{A_1A'} \cong \frac{y_2}{y_1} \cong \frac{VA''}{A_1B_1}$.

Apoi triunghiurile FVA'' şi FA_1B_1 sunt asemenea, deci $\frac{VA''}{A_1B_1} \cong \frac{VF}{FB_1} = \frac{R/2}{x_1 - R/2}$. Aşadar, $\frac{y_2}{y_1} = \frac{x_2}{x_1}$ şi $\frac{x_2}{x_1} = \frac{R}{2x_1 - R}$.

Atunci $2x_1x_2 = R(x_1 + x_2)$, deci $\frac{x_1 + x_2}{x_1x_2} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$.

Am demonstrat astfel următoarele formule:

$$\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} = \frac{1}{f}, \quad \frac{y_2}{y_1} = \frac{x_2}{x_1} \tag{9}$$

numite **formulele fundamentale ale oglinzilor concave**.

<u>Notă:</u> Aceste formule sunt aproximative (deoarece, de exemplu, am identificat arcul mic de cerc VA'' cu coarda VA'').

Ele se aplică suficient de precis în cazul când razele incidente sunt apropiate de axa optică.

Exemplu: O oglindă concavă are raza R=30 cm şi în faţa ei, la distanţa de 45 cm, se află un băţ vertical de 6 cm. Să se precizeze poziţia şi dimensiunea imaginii băţului.

Soluţie: Folosind notaţiile anterioare, $f = \frac{R}{2}$=15cm; apoi x_1=45cm, y_1=6cm; A_1(-45,6); B(-45,0) şi A_2(- x_2 ,- y_2).

Deoarece $\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} = \frac{1}{15}$, rezultă x_2=22,5cm. Apoi, $\frac{y_2}{6} = \frac{22,5}{50}$, deci y_2=2,7cm. Ca atare, A_2(-22,5;-2,7) şi B_2(-22,5;0). Obiectul iniţial este identificat cu vectorul $\overrightarrow{A_1B_1} = 6\vec{j}$, iar imaginea lui este vectorul $\overrightarrow{B_2A_2} = -2,7\vec{j}$, cu lungimea 2,7 cm şi este orientat în jos.

Notă: Reţinem că x_1=distanţa de la vârful V al oglinzii concave la obiectul aflat în faţa oglinzii, x_2=distanţa de la V la imagine, y_1=dimensiunea obiectului şi y_2=dimensiunea imaginii.

Reamintim de asemenea formulele (4) şi (8) ale dioptrului. Se observă că formulele oglinzii concave se obţin înlocuind $n_2 = -n_1$.

2.4. Oglinzi sferice convexe

Se consideră o oglindă sferică convexă, cu centrul C, raza R, vârful V, focarul F (situat la mijlocul segmentului CV) şi axa optică CV (fig. 4.14), raportată la un reper ortonormal xVy.

O rază incidentă A_1A' paralelă cu axa optică are ca rază reflectată corespunzătoare, prelungirea semidreptei FA'. Raza incidentă A_1C are ca reflectată prelungirea semidreptei CA_1. Imaginea punctului – obiect A_1 este A_2=intersecţia dreptelor FA' şi CA_1. Imaginea lui B_1 este B_2 şi imaginea obiectului A_1B_1 este „băţul vertical" A_2B_2, aşezat în spatele oglinzii (deci imaginea este virtuală).Rămân deci valabile formulele de la oglinzile concave, cu modificarea că $A_1(x_1, y_1)$, cu $x_1<0$ şi nu $(-x_1, y_1)$; apoi, $\frac{y_2}{y_1} = -\frac{x_2}{x_1}$.

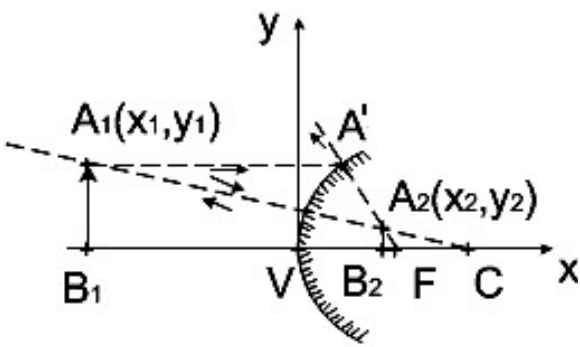


Fig. 4.14

Exemplu: O oglindă convexă are raza de 60 cm şi în faţa ei se află, la distanţa de 100 cm, un obiect vertical de 10 cm. Să se precizeze poziţia şi dimensiunea imaginii acelui obiect.

Soluţie: Cu notaţii transparente, avem $\frac{1}{x_1}+\frac{1}{x_2}=\frac{2}{R}$, deci

$\frac{1}{-100}+\frac{1}{x_2}=\frac{2}{60}$, de unde x_2=23,1cm. Apoi, $\frac{y_2}{10}=-\frac{23,1}{-100}$, deci

y_2=2,3cm şi imaginea este virtuală şi mai mică.

Notă: În practică, se utilizează **oglinzi cilindrice** şi mai ales **oglinzi parabolice** (care folosesc „proprietatea optică" a parabolei conform căreia pentru razele incidente paralele cu axa parabolei, razele reflectate trec prin focarul parabolei). Oglinzile parabolice se întâlnesc la captatoarele solare, la observatoare astronomice, dar şi la farurile de automobil.

§ 3. LENTILE

Definiţie: O **lentilă** este un mediu transparent, limitat de doi dioptri sferici, relativ subţiri sau de unul sferic şi altul plan. Lentilele sunt confecţionate din sticlă sau din unele materiale plastice.

3.1. Clasificarea lentilelor şi construirea imaginilor prin lentile

Lentilele se împart în **convergente** (mai groase la mijloc) şi **divergente** (mai subţiate la mijloc).

În figura 4.15 sunt indicate trei lentile convergente şi în figura 4.16 alte trei, divergente.

Orice lentilă are un centru (notat de regulă O), un focar–obiect F_1 (al cărui punct–imagine este aruncat la infinit) şi un focar–imagine F_2 (care este imaginea unui punct–obiect aruncat

la infinit); axa optică F_1F_2 uneşte centrele dioptrilor şi distanţa focală este f ($OF_1=OF_2=f$).

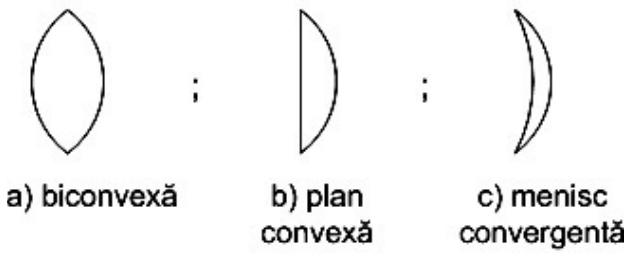


Fig. 4.15

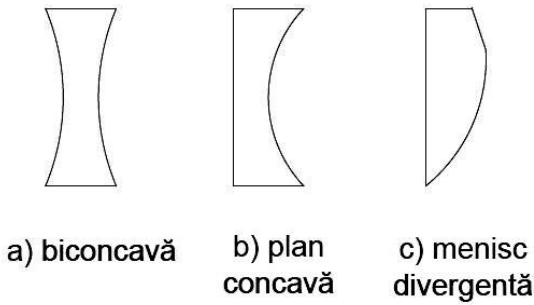


Fig. 4.16

Pentru construirea imaginilor prin lentile se folosesc următoarele reguli:

- orice rază incidentă paralelă cu axa optică se refractă prin focarul F_2;

- orice rază incidentă care trece prin F_1 se refractă paralel cu axa optică;

- orice rază incidentă care trece prin centrul O al lentilei nu este deviată;

- lentilele divergente au focarele inversate (focarul–obiect în dreapta şi focarul–imagine în stânga).

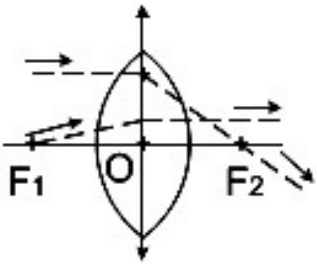


Fig. 4.17

Ca exemplu tipic, considerăm o lentilă biconvexă (fig. 4.17) şi o lentilă biconcavă, figura 4.18.

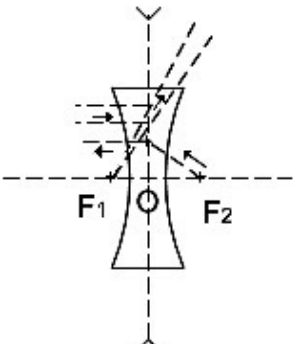


Fig. 4.18

3.2. Formulele lentilelor

Considerăm o lentilă convergentă şi cazul când imaginea unui obiect real este tot reală (nu virtuală); figura 4.19. În acest caz, triunghiurile $A_2B_2F_2$ şi $A'OF_2$ sunt asemenea, deci $\frac{F_2B_2}{OF_2} = \frac{A_2B_2}{OA'}$, deci $\frac{x_2 - f}{f} = \frac{y_2}{y_1}$. Apoi triunghiurile OA_2B_2 şi OA_1B_1 sunt asemenea, deci $\frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{OB_2}{OB_1}$, adică $\frac{y_2}{y_1} = \frac{x_2}{-x_1}$.

Aşadar, $\frac{x_2 - f}{f} = \frac{x_2}{-x_1}$, deci $fx_1 - fx_2 = x_1x_2$ şi împărţind ambii termeni cu fx_1x_2, rezultă relaţiile:

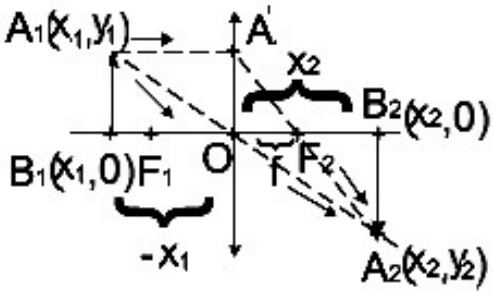


Fig. 4.19

$$\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} = \frac{1}{f} \text{ şi ca lungimi } y_2 = y_1 \frac{x_2}{x_1} \qquad (10)$$

numite **formulele lentilelor subţiri**.

Considerăm şi cazul unei lentile divergente (figura 4.20).

În acest caz, avem imaginea virtuală a unui obiect real. Din nou $\frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{OB_2}{OB_1}$, $\frac{A_2B_2}{A'O} = \frac{F_2B_2}{OF_2}$ şi $A'O = A_1B_1$, regăsind formulele (10).

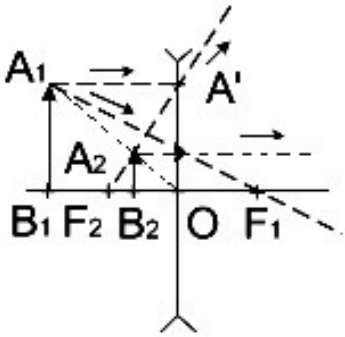


Fig. 4.20

Exemplu: O lentilă convergentă are distanţa focală f=20cm. În faţa ei, la 60 cm se află un „băţ vertical” cu înălţimea de 6 cm. Să se indice caracteristicile imaginii acelui băţ.

Soluţie: Folosim formulele (10). Mai întâi, rezultă $x_2 = \frac{x_1 f}{x_1 + f} = \frac{(-60)\cdot 20}{-60+20}$=30cm. Apoi, $y_2 = y_1 \frac{x_2}{x_1} = 6 \cdot \frac{30}{-60}$=-3.

Aşadar, imaginea este reală, răsturnată şi de două ori mai mică.

Notă: Formula (10) poate fi utilizată pentru a determina, în cazul unor lentile necertificate, distanţa focală. Anume, $f = \frac{x_1 x_2}{x_1 - x_2}$ şi se pot organiza experimente ad-hoc. De exemplu, considerăm un bec (B), aflat în faţa unei lentile (L), urmată de un ecran (E), ca în figura 4.21.

Dacă x_1=-30, x_2 =40, atunci $f = \frac{(-30)(40)}{-30-40} \cong 17\,\text{cm}$.

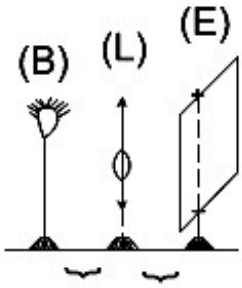


Fig. 4.21

În continuare, prezentăm pentru lentilele convergente câteva situaţii concrete; modificăm puţin notaţiile, notând cu d distanţa de la obiectul AB la lentilă şi cu d' distanţa de la lentilă la imaginea $A'B'$.

Cazul $d>2f$ şi $f< d' <2f$ (figura 4.22)

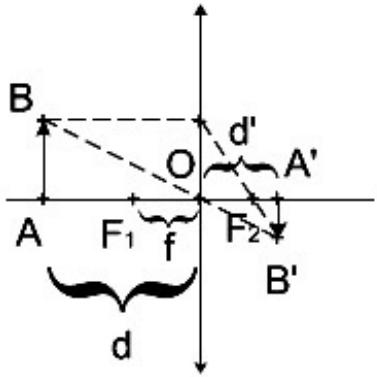


Fig. 4.22

În acest caz, imaginea este reală, răsturnată şi micşorată.

În cazul când $d=2f$ şi $d'=2f$, imaginea este reală, răsturnată, cu păstrarea dimensiunii.

Cazul $f<d<2f$ şi $d'>2f$ (figura 4.23)

Imaginea este reală, răsturnată şi mărită.

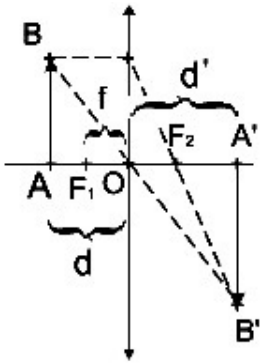


Fig. 4.23

Cazul $d<f$ şi $d'>f$ (figura 4.24)

În acest caz, imaginea este virtuală, nerăsturnată şi mărită.

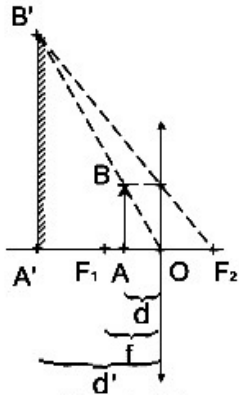


Fig. 4.24

În cazul unei <u>lentile divergente, cu *d>f*</u> imaginea este virtuală şi nerăsturnată (figura 4.25).

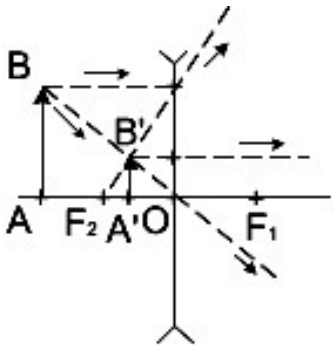


Fig. 4.25

<u>Notă:</u> În cazul lentilelor cu doi dioptri sferici de raze diferite R_1, R_2, are loc următoarea formulă:

$$\frac{1}{f} = (n-1)(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) \qquad (11)$$

într-un mediu cu indicele de refracţie n şi aer. R_1 se consideră cu semnul „+” dacă suprafața sferică respectivă este convexă.

Aceasta este numită **formula opticienilor**, folosită la proiectarea unor lentile de ochelari.

Dar, atenţie! Formula se aplică în diverse situaţii, cu convenţiile de semn indicate (figura 4.26 a, b).

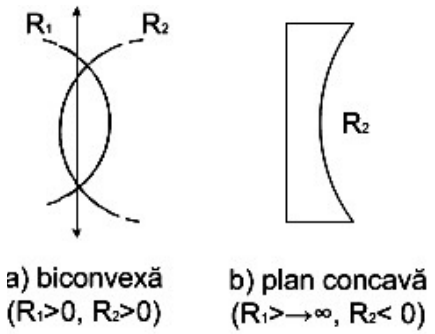


Fig. 4.26

<u>Exemple:</u> 1) Să se afle f în situaţia a) cu R_1=0,1cm, R_2=0,15 cm şi n=1,5. Avem $\frac{1}{f}=0,5(\frac{1}{0,1}+\frac{1}{0,15})$, deci f≅0,12cm.

2) Dacă în cazul b) avem R_2= 4, atunci $\frac{1}{f}=0,5(0+\frac{1}{-4})$ şi f=−8cm, deci lentila este divergentă.

3) Un băţ vertical cu înălţimea de 5 cm este situat la distanţa de 40 cm în faţa unei lentile menisc–divergente din sticlă, cu razele de 10 şi 20 cm. Să se determine caracteristicile imaginii (figura 4.27).

<u>Soluţie:</u> La sticlă, n=1,55. Conform (11), R_1<0, R_2>0, deci $\frac{1}{f}=0,55(\frac{1}{-10}+\frac{1}{20})$ şi f=−36cm. Apoi $\frac{1}{x_2}-\frac{1}{x_1}=\frac{1}{f}$, deci

$x_2 = \frac{x_1 \cdot f}{x_1 + f} = \frac{(-40)\cdot(-36)}{(-40)+(-36)} = -18{,}9\,\text{cm}$. Imaginea are dimensiunea $y_2 = \frac{x_2}{x_1} \cdot y_1 = \frac{-18{,}9}{-40} \cdot 5 \cong 2{,}4\text{cm}$. Imaginea este virtuală, nerăsturnată (y_2>0) și mai mică decât originalul.

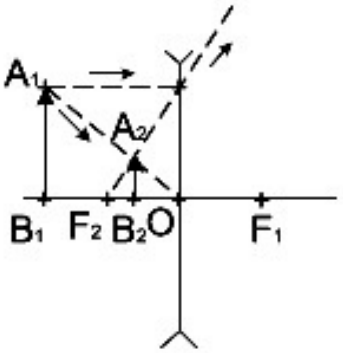


Fig. 4.27

3.3. Dioptrii

Opticienii măsoară „puterea” unei lentile în dioptrii. Termenul de putere nu are legătură cu cel din Mecanică sau Energetică.

Definiţie: **Convergența** (sau puterea optică) a unei lentile cu distanţa focală f este

$$C = \frac{1}{f}\text{, măsurată în dioptrii } (=\text{m}^{-1}). \qquad (12)$$

O dioptrie este convergența unei lentile cu f=1m.

Exemplu: Dacă distanţa focală este f=0,4m, atunci lentila are $C = \frac{1}{0{,}4}$=2,5 dioptrii.

O dioptrie mai mare înseamnă o lentilă mai puternică. Pentru lentilele convergente (respectiv divergente), avem $C>0$ (respectiv $C<0$). Dacă se leagă în serie două lentile subţiri, atunci dioptriile (adică puterile) se adună. Vom reveni asupra dioptriilor după ce prezentăm ochiul uman ca instrument optic.

§ 4. INSTRUMENTE OPTICE

Există un mare număr de instrumente optice, numite şi „ochi înarmaţi”, al căror rol este acela de a ajuta omul. Lista lor cuprinde: ochelari, binoclu, lupă, aparat foto, proiector, microscop, telescop etc. Unele instrumente optice dau **imagini reale**, care pot fi captate pe un ecran sau înregistrate pe un film (de exemplu, aparat foto, proiectorul sau retroproiectorul); altele dau **imagini virtuale**, care pot fi apoi observate cu ochiul (de exemplu, luneta, microscopul, telescopul).

4.1. Ochiul şi ochelarii

În esenţă, ochiul este un instrument optic care formează imagini reale, acoperind un câmp vizual de peste 170^0. El distinge obiecte depărtate la câţiva km, cu o rezoluţie apropiată de cea impusă de proprietăţile ondulatorii ale luminii. Se consideră că un ochi normal distinge fără efort de acomodare detalii de peste 0,2 mm, aflate nu mai aproape de 20 cm de retină. În continuare, descriem modul de formare a imaginii pe retină, numit şi **funcţionarea ochiului**. Razele de lumină provin de la obiectul privit şi se reflectă prin **cornee** (membrană

traversată de lumină) şi apoi prin **cristalin**, formând imaginea obiectului pe **retină** (suprafaţa interioară a globului ocular).

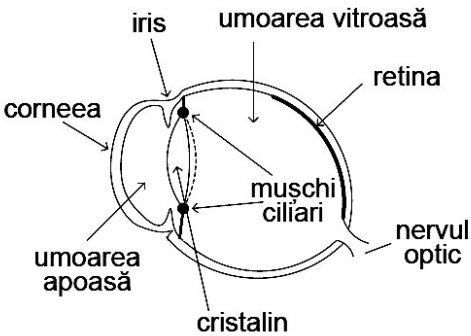


Fig. 4.28

Cristalinul joacă rolul unei lentile de dimensiuni variabile, cu indicele de refracţie $n \cong 1{,}4$. Spaţiul care separă corneea de cristalin conţine un fluid (umoarea apoasă) şi dincolo de cristalin, se găseşte umoarea vitroasă, un fel de jeleu fin. Pe retină se află terminațiile nervului optic. Distanţa între cristalin şi retină este fixă, astfel încât se modifică doar distanţa focală f a cristalinului (prin modificarea curburilor cristalinului ca urmare a acțiunii muşchilor ciliari, operaţie numită **acomodare**). Astfel, în cazul unor obiecte apropiate de ochi, cristalinul se bombează şi astfel se micşorează f. Nu mai dăm detalii privind acuitatea vizuală, sensibilitatea, legătura cu creierul.

Ochiul miop are cristalinul mai bombat şi focarul acestuia se află în faţa retinei. Miopul nu poate vedea mai departe, fapt care se corectează aşezând înaintea corneei o lentilă

divergentă (D); în acest fel, se obţine practic o lentilă convergentă cu *f* mai mare.

Ochiul prezbit (≡**hipermetrop**) are focarul în spatele retinei şi atunci se aşază o lentilă convergentă în faţa corneei.

În figura 4.29 indicăm acomodarea (≡corecţia) unui ochi miop. În cazul unui prezbit, lentila (D) este înlocuită cu o lentilă convergentă (C).

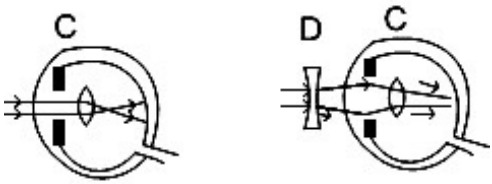


Fig. 4.29

Exemplu: Un ochi miop are punctul „remotum” (punctul peste care nu mai are loc acomodarea) la distanţa δ=0,8 m, iar punctul „proximum” (sub care nu se mai realizează acomodarea) la distanţa δ_1=0,1 m. Ce fel de lentilă trebuie folosită la ochelarii de corecţie aflaţi la distanţa *b*=3 cm de centrul optic O al cristalinului?

Soluţie: În figura 4.30 considerăm schematic lentila–cristalin (C) şi lentila divergentă (D), δ=0,8. Lentila (D) deplasează punctul remotum la infinit, deci în focarul–imagine al lentilei.

Aşadar, $-\frac{1}{\delta - b} - \frac{1}{\infty} = \frac{1}{f}$, adică $-\frac{1}{0,8 - 0,03} - 0 = \frac{1}{f}$, de unde f=−1,24m şi C≅−0,8 dioptrii. Pentru punctul proximum avem $\frac{1}{\delta_2} - \frac{1}{\delta_1} = C$, deci $\delta_2 = \frac{\delta_1}{C\delta_1 + 1} = \frac{-0,1}{(-0,8)(-0,1)+1}$=-0,09.

Aşadar, ochiul normal se acomodează cu obiecte îndepărtate (la peste 10 cm), obţinându-se pe retină o imagine clară.

Dar unul miop, nu; iar un prezbit nu vede clar obiectele apropiate de ochi. **Ochelarii** uzuali au lentile care permit corecţia în ambele cazuri; ochelarii pentru depărtare „mută" obiectele dincolo de punctul de acomodare şi ochelarii pentru citire, „aduc" obiectele de la distanţa–standard pentru ochiul normal (25 cm) la distanţa optimă de vedere.

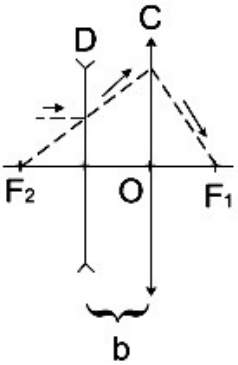


Fig. 4.30

<u>Exemple:</u> 1) Un miop distinge cel mai bine o literă mică aflată la distanţa δ_0=17 cm de ochi. Ce ochelari de citire îi sunt necesari?

Răspuns: Presupunem că miopul ţine cartea sau ziarul la distanţa δ_0=17 cm. Conform formulei (10), $\frac{1}{\delta_0}-\frac{1}{\delta}=\frac{1}{f}$ şi sunt necesare $C=\frac{1}{f}=\frac{\delta-\delta_0}{\delta\delta_0}=\frac{17-25}{17\cdot 25}$=-0,019 cm^{-1}=−1,9 dioptrii.

2) Ce ochelari îi sunt necesari cuiva pentru care distanţa optimă de vedere este δ = 60 cm?

Răspuns: $C=\frac{1}{f}=\frac{\delta-\delta_0}{\delta\delta_0}=\frac{60-25}{60\cdot 25}$=0,023 cm^{-1}=+2,3 dioptrii.

4.2. Aparatul foto

Orice aparat foto are o lentilă–obiectiv (pe scurt obiectiv), cu ajutorul căreia se obţine pe o peliculă imaginea obiectelor fotografiate (dar şi pe un film fotografic sau pe un detector de stocare electronică a imaginilor). Deplasând obiectivul faţă de peliculă, se obţine o imagine clară a obiectului fotografiat, aflat la diverse distanţe de aparatul foto (fig. 4.31).

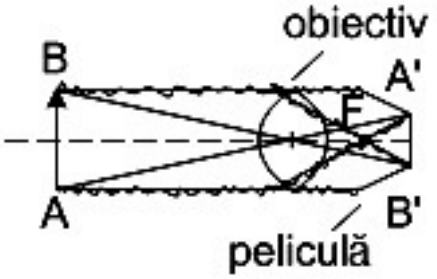


Fig. 4.31

Pelicula de film fotografic este alcătuită din microcristale fotosensibile; iluminarea unui punct se înregistrează pe negativ ca un **pixel** („mică pată” cu dimensiuni de $10 \times 10 \mu m^2$).

Calitatea imaginii depinde de timpul de expunere şi de diametrul diafragmei care determină iluminarea peliculei. În ultimul timp, s-au realizat mari progrese în automatizarea şi facilitarea luării de fotografii, inclusiv celebrele „selfies”.

Exemplu: Un aparat foto are o lentilă–obiectiv cu distanţa focală de 40 mm şi fotografiem un copac înalt de 3 m, aflat la distanţa de 8 m. Ce înălţime are imaginea copacului pe peliculă?

Răspuns: Aplicăm formula (10), de unde $x_2 = \frac{x_1 \cdot f}{x_1 + f}$ şi $\frac{y_2}{y_1} = \frac{x_2}{x_1} = \frac{f}{x_1 + f}$. Aşadar, $\frac{y_2}{y_1} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{-8 + 40 \cdot 10^{-3}} = -\frac{4}{796}$. Cum y_1=3m=300cm, rezultă că $y_2 = -\frac{1200}{796} \cong -1{,}5\,\text{cm}$ (imagine răsturnată).

Aplicaţie: Pe un satelit artificial aflat pe o orbită circulară, la înălţimea h=300 km de Pământ este plasat un aparat foto, al cărui obiectiv (L) are distanţa focală f=50cm. Presupunem că dimensiunea minimă de distingere a detaliilor obiectului fotografiat din satelit este a=20μm. Determinăm dimensiunea minimă Δ a obiectelor de pe Pământ care se disting pe peliculă (figura 4.32).

Deoarece $h \gg f$, se poate considera că obiectele fotografiate se află la infinit, iar imaginile lor se obţin cu suficientă precizie în planul focal al obiectivului (L). Evident, $\frac{\Delta}{a} = \frac{h}{f}$ şi condiţia de a putea distinge obiecte cu dimensiuni mai mari decât a este ca $\Delta \geq a\frac{h}{f}$.

Dar, $a\frac{h}{f} = 20 \times 10^{-6} \times \frac{300 \times 10^{3}}{50 \times 10^{-2}} = 12$. Aşadar, $\Delta \geq 12$ m.

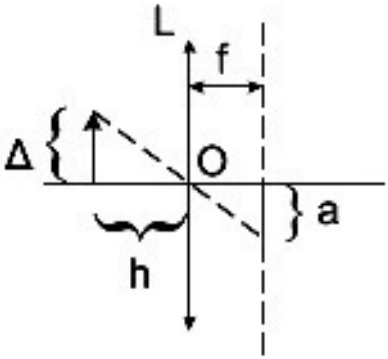


Fig. 4.32

4.3. Lupa

Lupa este de fapt o lentilă convergentă cu distanţa focală f de ordinul centimetrilor. Cu o lupă se obţin imagini virtuale mărite ale unor obiecte de mici dimensiuni. Obiectul observat se plasează în apropierea focarului lupei, astfel încât imaginea să se formeze la minimum 25 cm, pentru a evita acomodarea forţată a ochiului (figura 4.33).

Dacă $A_1B_1=y_1$ este dimensiunea obiectului iniţial, **puterea lupei** este $P=\frac{\mathrm{tg}\alpha_2}{y_1}=\frac{y_1/OF_2}{y_1}=\frac{1}{f}$, unde α_2 este unghiul sub care imaginea A_2B_2 este văzută prin lupă (adică din focarul F_2). Puterea unei lupe se măsoară în dioptrii.

Exemplu: Grosismentul unei lupe (mărirea unghiulară percepută de ochi) este $\gamma=\frac{0,25}{f}\cong\frac{1}{4}P$. Dacă un colecţionar de timbre utilizează o lupă cu f=0,12m, atunci $\gamma\cong 2$, deci lupa distinge detalii de 2 ori mai fine decât ochiul liber.

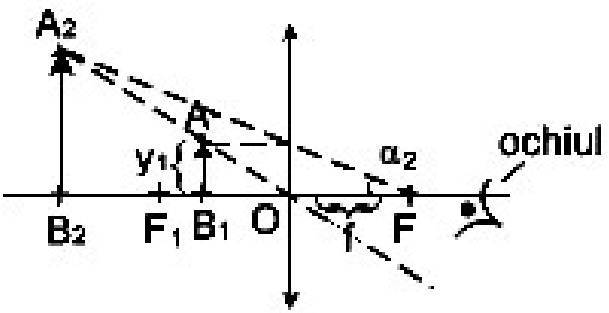


Fig. 4.33

4.4. Microscopul optic

Acesta este un instrument optic clasic (utilizat de biologi, medici, chimişti), care dă imagini virtuale. Problema pe care o rezolvă microscopul este aceea de a obţine o cât mai mare mărire a imaginii unor obiecte mici (corpusculi, infuzori, bacterii etc.)

Există totuşi limitări inerente ale măririi, datorită naturii ondulatorii a luminii, când lungimea de undă a luminii este comparabilă cu dimensiunea obiectului urmărit. Orice microscop constă din două lentile convergente – **obiectivul** L_1 (de fapt un ansamblu de lentile) şi **ocularul** L_2. Obiectivul L_1 este dispus spre obiectul observat *AB* şi dă o imagine reală mărită A_1B_1 a lui *AB*, iar ocularul este dispus în faţa ochiului observatorului (ocularul este folosit ca o lupă, dând o imagine virtuală mărită A_2B_2 cu ochiul acomodat la infinit); figura 4.34. L_2 este ca o lupă cu focarul F_2 în apropierea imaginii A_1B_1. Imaginea finală A_fB_f prin microscop se obţine mărită şi răsturnată în apropierea ochiului observatorului.

Grosismentul ocularului L_2 este $G = \dfrac{0,25}{f_2}$.

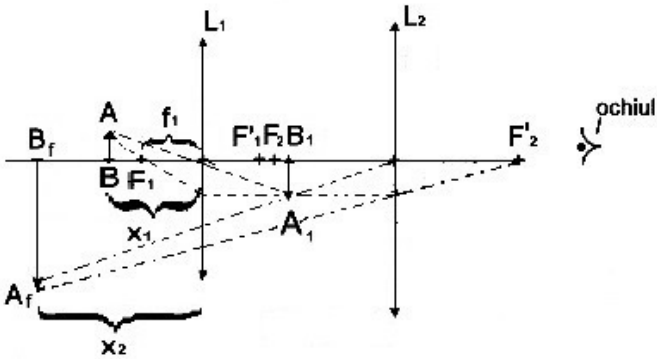


Fig. 4.34

<u>Exemplu:</u> Presupunem că L_1 (respectiv L_2) are distanţa focală f_1=0,3 cm (respectiv f_2=0,8 cm) şi că imaginea formată de

obiectiv se află la 0,2 m de acesta. Determinăm unde se află obiectul şi grosismentul.

Răspuns: Aplicând formula (10), $\frac{1}{x_1}+\frac{1}{x_2}=\frac{1}{f_1}$ cu x_2=0,2m, rezultă $\frac{1}{x_1}=\frac{1}{0,3\times10^{-2}}-\frac{1}{0,2}$, deci x_2=0,3cm. Apoi mărirea produsă de obiectivul L_1 este $\frac{x_2}{x_1}=\frac{0,2}{0,3\times10^{-2}}\cong 67$. Iar grosismentul lupei L_2 este $\frac{0,25}{0,8\times10^{-2}}\cong 31$, deci microscopul măreşte de circa $67\times31\cong 2100$ ori.

Notă: Microscoapele au şi sisteme de iluminare. Astăzi există microscoape (electronice) mult mai performante, bazate pe alte principii. S-a ajuns la măriri de sute de mii de ori, chiar şi la capacitatea de a distinge între molecule sau chiar atomi.

4.5. Lunetă, telescop

Lunetele sunt instrumente optice folosite pentru observarea obiectelor îndepărtate (invers faţă de microscoape). Telescoapele sunt lunete mai mari („tele”≡departe; „skopein”≡a cerceta), care în plus au şi oglinzi parabolice în zona obiectivului. Lunetele deviază razele de lumină paralele care sunt focalizate pe retina ochiului observatorului, după schimbări mari de direcţie prin sistemul de lentile. Imaginea pe retină este mai luminoasă dacă densitatea razelor de lumină ajunse acolo este mai mare.

Practic, lunetele sunt de două tipuri: **astronomică** (≡tip

Kepler), constând din două lentile convergente L_1, L_2 şi **terestră** (≡tip Galilei), având o lentilă convergentă şi una divergentă. În figura 4.35 indicăm o schemă a **lunetei Kepler**. Ea este similară unui microscop şi produce o imagine reală răsturnată; deşi este mai mică decât obiectul îndepărtat, ea este mai apropiată de ochi. Lentila ocular acţionează ca o lupă care creşte mărimea unghiulară a imaginii.

Avem $f_1 \cdot \mathrm{tg}\varphi_1 = I \cong f_2 \cdot \mathrm{tg}\varphi_2$. Dar pentru unghiuri mici u, avem tg$u \cong u$. Atunci $\frac{f_1}{f_2} \cong \frac{\mathrm{tg}\varphi_2}{\mathrm{tg}\varphi_1} \cong \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$, iar lungimea lunetei Kepler este, cu aproximaţie, f_1+f_2.

Imaginea I se formează în apropierea focarului F_2 al ocularului, iar imaginea finală I_f, în apropierea focarului obiectivului; practic, $F_1^{'}$ şi F_2 sunt foarte apropiate.

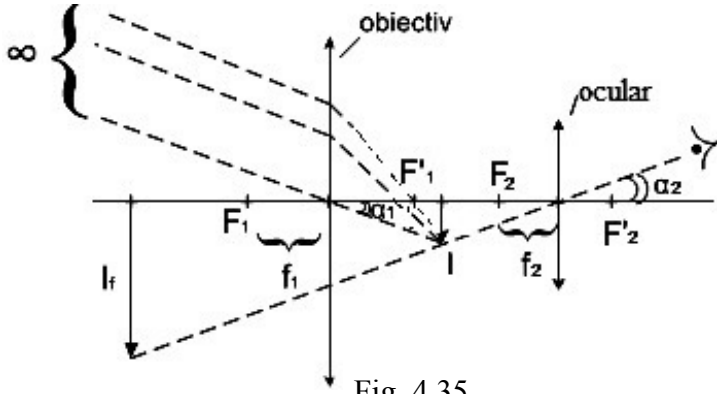


Fig. 4.35

Schema unei lunete de tip Galilei este indicată în figura 4.36. Imaginea nu mai este răsturnată.

Lentila oculară (divergentă) este plasată înainte ca razele de la obiectiv să se întâlnească pentru a forma imaginea. Lunetele Galilei au o putere mai redusă de mărire.

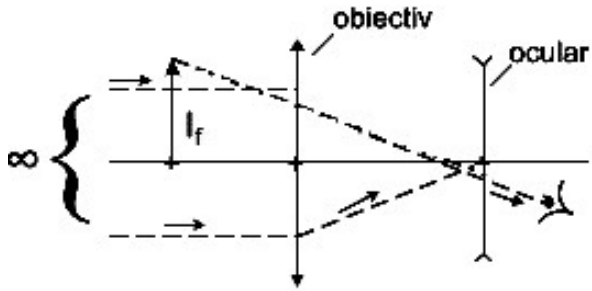


Fig. 4.36

Binoclul militar (de câmp) sau binoclul de teatru sunt lunete de tip Galilei.

Notă: Primul telescop a fost construit de Newton în 1672. Actualmente s-a ajuns la telescoape mari, care folosesc multe sisteme de lentile, ca şi oglinzi concave, pentru creşterea luminozităţii şi pentru a evita aberaţiile cromatice.

În 1990 s-a construit celebrul telescop spaţial Hubble, montat pe un satelit; el a evitat disturbanţele atmosferei terestre şi a obţinut informaţii excepţionale asupra unor noi obiecte stelare, explozii cosmice, planete din alte sisteme solare etc.

§ 5. ALTE FENOMENE OPTICE

Vederea este o activitate considerată pasivă din partea fiinţelor vii înzestrate ca atare, implicând mult creierul. Lumina este emisă de o sursă sau mai multe, fără prezenţa noastră. Nu

vedem razele de lumină aflate „în zbor” şi doar atunci când privim un obiect, vedem lumina care se reflectă după ce se izbeşte de el sau de particule de praf.

5.1. Umbre, eclipse

Sursele de lumină emit în toate direcţiile. Obiectele opace (netransparente) împiedică lumina să ajungă în anumite locuri; pe ecrane sau pe alte obiecte apar atunci regiuni puternic întunecate – **umbre**, iar în jurul lor se formează **penumbre**. Pe Pământ nu există umbre negre totale datorită atmosferei terestre care permite percepţia luminii stelare, dar pe Lună, umbrele sunt complet negre.

O manifestare spectaculoasă a umbrelor o reprezintă **eclipsele**. În timpul unei eclipse de Soare, umbra Lunii mătură o porţiune din suprafaţa Pământului (figura 4.37).

Pentru cei aflaţi în partea cu umbră, Soarele este total acoperit (eclipsă totală) creându-se un „inel luminos” spectaculos. Eclipsele pot fi doar parţiale pentru cei situaţi în penumbră.

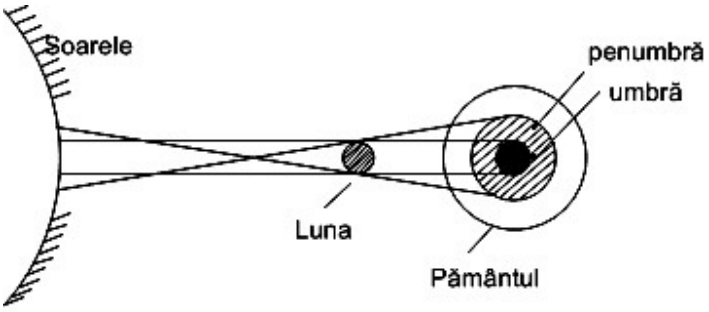


Fig. 4.37

În timpul eclipselor de Lună, Pământul este cel care asigură umbra. Dacă eclipsele solare sunt rare, cele lunare sunt foarte dese. Din observarea eclipselor de lună, Aristotel a dedus forma sferică a Pământului, ceea ce a fost acceptat doar după aproape 2000 de ani.

5.2. Camera obscură

Dacă plasăm pe un perete un film fotografic şi în faţă un obiect, filmul va fi complet expus şi obiectul nu va lăsa nici o urmă pe acel film. Dar dacă punem un ecran între obiect şi film şi dacă facem un orificiu/gaură în acel ecran, se va observa o imagine răsturnată a acelui obiect şi imaginea devine mai clară dacă acest orificiu este mai mic.

Fenomenul a fost descoperit în Evul Mediu şi a permis realizarea unor „fotografii" bune ale unor obiecte statice – peisaje sau portrete, după un timp lung de expunere.

Se poate realiza o cutie *F* („camera obscură") ca în figura 4.38, cu o fereastră de vizualizare, un orificiu G, şi un obiect aşezat în faţa orificiului, care se va proiecta răsturnat pe peretele haşurat.

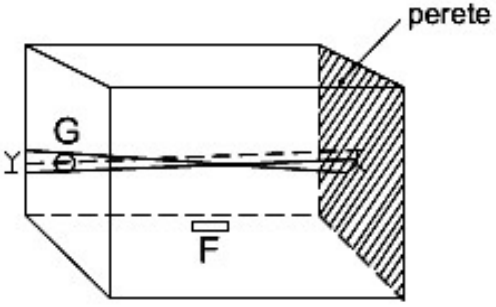


Fig. 4.38

5.3. Oglinzi multiple şi retroreflectoare

Dacă razele de lumină se reflectă prin două sau mai multe oglinzi, se observă efecte optice interesante ale reflexiilor multiple ale luminii. Nu ne referim la caleidoscoape sau la periscoape care permit acces vizual la zone inaccesibile vederii directe şi nici la tehnicile moderne de supraveghere vizuală.

Considerând două oglinzi perpendiculare, planele perpendiculare pe muchia lor de intersecţie sunt paralele. Orice rază de lumină incidentă $\alpha, \beta, ...$ aflată într-un astfel de plan se reflectă după două reflexii după raze paralele $\alpha', \beta', ...$ cu cele incidente (figura 4.39; a)

Considerând trei oglinzi, două câte două perpendiculare (ca într-un colţ reflector de cameră format din doi pereţi verticali adiacenţi şi cu tavanul), orice rază de lumină incidentă se reflectă după una paralelă cu ea.

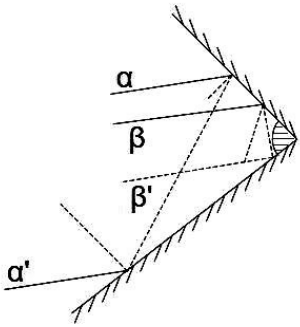


Fig. 4.39

Această proprietate este folosită la retroreflectoarele de bicicletă („ochi de pisică”) astfel încât lumina de la farurile unei maşini să fie reflectată spre şoferul maşinii; multe reflectoare au

suprafaţa acoperită cu găuri în formă de colţ de cub. De asemenea, cosmonauţii au plasat pe Lună şi pe sateliţi artificiali panouri cu retroreflectoare pentru raze laser trimise de pe Pământ; în acest mod, s-au măsurat cu mare precizie diverse distanţe şi unghiuri, utilizate la proiectarea GPS şi a sistemelor militare.

5.4. Culorile

De culori se ocupă nu numai fizicienii, ci şi chimiştii, psihologii, fiziologii şi artiştii. Fără a mai vorbi de cei care leagă frumuseţea vieţii tocmai de „beţia culorilor”. Newton a descoperit că lumina albă este de fapt suprapunerea multor componente purtătoare de diverse culori (vom relua în capitolul următor teoria spectral/ondulatorie a luminii). Culoarea este determinată de lumina care intră în ochii noştri, reflectată de obiectele privite. Faptul că vedem o cămaşă roşie (la lumina albă) înseamnă că pigmenţii din vopseaua folosită absorb celelalte culori, cu excepţia culorii roşii; dacă lumina care ne vine în ochi nu ar avea componenta roşie, am vedea cămaşa neagră, deoarece toate celelalte culori sunt absorbite. Din trei culori de bază (roşu, verde şi albastru) combinate corespunzător se poate obţine majoritatea celorlalte culori. La întrebarea: „de ce Soarele este galben şi cerul – albastru” un răspuns este următorul: Soarele radiază lumina albă dar în atmosfera terestră, celelalte componente în afara culorii „galben” sunt absorbite de moleculele aerului etc. Referitor la culori există multe fenomene

importante – lumina fluorescentă, filtrele de selecţie a componentelor, culorile complementare, televizunea în culori.

5.5. Refracţia atmosferică, mirajele

Ne aflăm la fundul unui ocean atmosferic; atmosfera terestră nu este uniformă, densitatea aerului descrescând cu altitudinea. Indicele de refracţie al aerului depinde de densitate şi ca atare, apare fenomenul de **refracţie atmosferică**; aceasta revine la o deviere a razelor de lumină provenită de la corpuri cereşti. În ultimul timp, refracţia atmosferică este stăpânită, ceea ce a permis legături stabile de comunicaţii cu sateliţii artificiali şi dezvoltarea nu numai de aplicaţii militare, dar şi a unor aplicaţii civile importante (detectarea unor zăcăminte de materii prime, măsurarea din satelit a umidităţii solurilor, GPS etc.).

Condiţiile atmosferice normale sunt alterate dacă suprafaţa Pământului este foarte caldă sau foarte rece. Nu ne referim desigur la uragane, grindină, diluvii etc. Dacă solul este foarte rece, atunci densitatea atmosferei descreşte mai repede decât de obicei şi din acest motiv, razele de lumină „se curbează”; ca atare, unele obiecte par că se află deasupra solului, apar vapoare care plutesc („looming”) etc. Invers, aerul fierbinte de la sol face ca indicele de refracţie să fie mai mic, iar razele de lumină să fie curbate în sus; se produc astfel „miraje” cu imagini răsturnate (de tip Fata Morgana).

Ne oprim aici, dar vom reveni şi cu alte fenomene în care rolul principal revine tot luminii – dispersie, curcubeul, difracţie, polarizare, etc.

CAPITOLUL 5-FENOMENE ONDULATORII

Introducere

Un mijloc tipic de comunicare este acela de a trimite şi primi semnale sonore, luminoase sau mesaje scrise. Există mijloace materiale directe pentru a transmite informaţii, prin gesturi, cuvinte sau imagini, dar există şi altele subtile, invizibile, realizate cu consum mic de energie, aşa cum sunt **undele**. Undele se întâlnesc peste tot – la aruncarea unei pietre într-un lac liniştit, ascultând vioara sau pianul, vibraţiile unui motor şi apelând la „ochiul minţii”, la înţelegerea armoniei lumii subatomice. Pentru a putea studia proprietăţile undelor – propagare, viteză, suprapunere, amplificare sau atenuare, este esenţială modelarea matematică.

Întrebarea care s-a pus după anul 1700, dacă lumina este undă sau flux de particule, s-a extins la lumea subatomică şi nu numai, acolo unde percepţia directă lipseşte. Multe din fenomenele ondulatorii sunt deplasări colective de particule, care se propagă la distanţă, transportând energie şi cantitate de mişcare (≡impuls) generate de la sursă. Undele sonore se caracterizează prin deplasări „du-te vino” în direcţia propagării; la o coardă vibrantă, oscilaţiile sunt transversale, iar undele luminoase depind de variaţiile împletite ale câmpului magnetic şi ale celui electric. Fizica modernă a introdus concepte noi – „cuante”, „strings”–uri, undine, etc. care implică procesele ondulatorii ale particulelor elementare.

În acest capitol, începem cu studiul oscilaţiilor periodice, ca model pentru multe fenomene ondulatorii şi încercăm să adâncim studiul undelor sonore şi al undelor electromagnetice, incluzând şi o introducere în proprietăţile ondulatorii ale materiei profunde.

§ 1. OSCILAŢII / VIBRAŢII

1.1. Oscilaţii armonice

Definiţie: Se numesc **oscilaţii** (≡vibraţii) mişcările însoţite de modificări de stare „du-te vino" ale unor corpuri; modificările sunt repetate la diverse intervale de timp şi au loc pe aceeaşi traiectorie.

Toate obiectele vibrează – lichidele, gazele, solidele, lumina, instrumentele muzicale; unele o fac periodic (pendulele, inimile, astrele etc.).

Dacă modificările se referă la mărimi mecanice – deplasare, abateri, viteză etc. - se obţin oscilaţii mecanice. Dar se întâlnesc oscilaţii termice, electrice, radiative.

Oscilaţiile periodice sunt acelea în care valorile mărimii fizice urmărite $x(t)$ se repetă la aceleaşi intervale de timp, numite **perioade**; cea mai mică perioadă $T>0$ (astfel încât $\forall t,\ x(t)=x(t+T)=x(t+2T)...$) se numeşte **perioada principală** a oscilaţiei. Se defineşte **frecvenţa** oscilaţiei periodice ca fiind mărimea

$$f=\frac{1}{T}\text{, măsurată în Hertzi (≡ cicli/s).} \qquad (1)$$

Frecvenţa de 1 Hz (≡1 s^{-1}) este frecvenţa oscilaţiilor care au perioada principală de 1 s. Dacă se produc N oscilaţii în 1 s, se spune că frecvenţa este de N Hz.

Definiţia cinematică: Se numesc **oscilaţii armonice** (≡**mişcări armonice**) cele în care mărimea $x(t)$ urmăreşte „legea sinusului”; anume $x(t) = A\sin(\omega t + \alpha)$, unde A (A>0) este **amplitudinea** oscilaţiilor (exact valoarea maximă a lui $x(t)$); ω>0 este numită **frecvenţa unghiulară** (sau **circulară**). Perioada principală este

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad \text{deci} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \qquad (2)$$

măsurată în radiani/s; în fine, α este numită **faza iniţială** (sau **unghiul de fază**, măsurat în radiani).

Exemplu: Să considerăm un mobil (o bilă) M care se mişcă uniform pe un cerc (C) de rază A (A > 0), cu viteza unghiulară constantă ω (ω>0). Presupunem că la orice moment t, mobilul se află în poziţia $M_t(x(t), y(t))$, unde $x(t) = A\sin(\omega t + \alpha)$, $y(t) = A\cos(\omega t + \alpha)$. În poziţia $[1]$, $x_1(t) = A\sin\omega t$ şi în poziţia $[2]$, $x_2(t) = A\sin(\omega t + \alpha)$; aceeaşi poziţie x_2 este regăsită la momentele t, $t \pm T$, $t \pm 2T$,... (fig. 5.1).

Oscilaţiile cu aceeaşi frecvenţă ω, dar având diferite faze iniţiale se zic **defazate**, iar diferenţa dintre fazele iniţiale se numeşte **diferenţă de fază**. Abscisa $x(t)$ urmează tocmai legea sinusului, „du-te vino”, deci reprezintă o oscilaţie armonică.

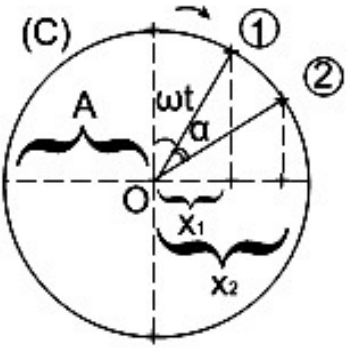


Fig. 5.1

<u>Definiţia dinamică:</u> Forţele elastice „de revenire”, îndreptate spre poziţia de echilibru produc oscilaţii armonice; ele cresc în modul pe măsura abaterii corpului de la această poziţie. Aşa sunt oscilaţiile unui mic obiect aflat la capătul unui resort suspendat (figura 5.2).

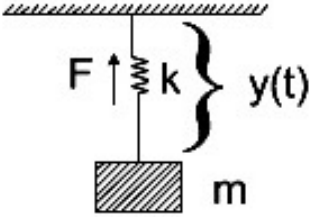


Fig. 5.2

Un alt exemplu îl constituie oscilaţiile efectuate de un pendul simplu. Un **pendul fizic** este un corp rigid suspendat dintr-un punct situat deasupra centrului său de greutate; un astfel de corp realizează oscilaţii. Un **pendul simplu** (sau **matematic**) are proprietatea că masa corpului este concentrată într-un punct; o aproximare este o bilă mică, suspendată printr-un fir inextensibil, iar masa firului şi rezistenţa aerului sunt neglijabile.

Vom vedea că pentru abateri unghiulare mici de la poziţia verticală de echilibru, oscilaţiile unui pendul matematic sunt armonice.

1.2. Studiu matematic al oscilaţiilor armonice

Fie $x(t)$ o funcţie derivabilă (de două ori) astfel încât pentru $\omega > 0$ constant, să aibă loc relaţia

$$x''(t) + \omega^2 \cdot x(t) = 0,\ \forall t. \qquad (3)$$

Aceasta se numeşte **ecuaţie diferenţială** (liniară, de ordin doi, cu coeficienţi constanţi). Se poate arăta că această ecuaţie diferenţială are o infinitate de soluţii, toate de forma $x(t) = C_1 \cos\omega t + C_2 \sin\omega t$, cu C_1, C_2 constante arbitrare. Pentru a obţine o soluţie unică, aceasta trebuie supusă la condiţii suplimentare. De exemplu, $x(0)=x_0$ şi $x'(0)=v_0$ (cu poziţia iniţială x_0 şi viteza iniţială v_0). Atunci $x(0)=C_1$ şi $x'(0)=C_2\omega$ $\Rightarrow C_1 = x_0,\ C_2 = \frac{v_0}{\omega}$. Soluţia este $x(t) = x_0 \cos\omega t + \frac{v_0}{\omega}\sin\omega t$.

Notăm $A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}}$ şi scriem $x(t) = A(\frac{x_0}{A}\cos\omega t + \frac{v_0}{\omega A}\sin\omega t)$.

Apoi alegem α astfel încât $\sin\alpha = \frac{x_0}{A}$, $\cos\alpha = \frac{v_0}{\omega A}$ (există un astfel de α deoarece se verifică relaţia $\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$). Atunci $x(t) = A(\sin\alpha\cos\omega t + \cos\alpha\sin\omega t)$, deci

$$x(t) = A\sin(\omega t + \alpha). \qquad (4)$$

Aşadar, soluţiile ecuaţiei (3) reprezintă anumite oscilaţii armonice.

Aplicaţii: 1) Fie un resort suspendat (cu coeficientul de elasticitate k; k=forţa în N necesară pentru întinderea resortului cu 1 m); figura 5.2. Atunci $F(y)=-ky$ (în limitele aplicării legii Hooke). Forţa este îndreptată împotriva creşterii lui y. Notând $y(t)$ ordonata la momentul t, conform legii a II-a a lui Newton, $ma=F$, deci

$$my''(t)= -ky(t), \text{ adică } y''+\frac{k}{m}y=0 \qquad (5)$$

tocmai o ecuaţie de tipul (3). Soluţiile sunt de forma (4) deci mărimea $y(t)$ reprezintă o oscilaţie armonică cu frecvenţa ciclică $\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$.

Notă: Un **pendul de torsiune** este un corp care realizează o mişcare de rotaţie/oscilaţie suspendat de un fir; mişcarea lui este de asemenea armonică, având o anumită perioadă de torsiune.

2) Ecuaţia (3) se întâlneşte şi la studiul oscilaţiilor „mici", libere, ale unui pendul simplu. Fie $\theta(t)$ abaterea unghiulară a pendulului de la poziţia AE verticală (de echilibru); figura 5.3. Dacă m este masa pendulului P şi $l=AE=AP$ este lungimea pendulului, greutatea pendulului este echilibrată de tensiunea din fir şi de forţa care accelerează pendulul, deci $-G\sin\theta = m\cdot s''(t)$, unde $s(t)$=lungimea arcului $\widehat{EP}$, $s(t)=l\,\theta(t)$, cu $\theta(t)$ măsurat în radiani.

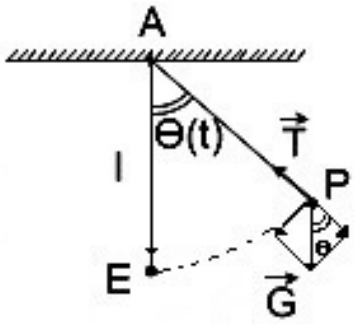


Fig. 5.3

Aşadar, $s''(t) = l\theta''(t)$, $-mg\sin\theta = ml\theta''(t)$. În fine, pentru $\theta(t)$ „mic” (sub 4°), $\sin\theta \cong \theta$ şi rezultă ecuaţia pendulului

$$\theta'' + \frac{g}{l}\theta = 0 \qquad (6)$$

similară cu (5) şi (3). În acest caz, $\omega^2 = \frac{g}{l}$ şi cum $\omega > 0$, rezultă $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$. Cu condiţiile iniţiale $\theta(0) = \theta_0$, $\theta'(0) = v_0$ rezultă $\theta(t) = \theta_0 \cos\omega t + \frac{v_0}{\omega}\sin\omega t$ şi amplitudinea oscilaţiilor este $A = \sqrt{\theta_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}}$. Perioada oscilaţiilor este

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ adică } T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Aceasta este celebra <u>formulă a lui GALILEI</u>.

Se întâlnesc, de asemenea, oscilaţii armonice în cazul studiului curentului electric alternativ. Anume, vom vedea în subparagraful 4.1 că dacă avem un circuit LC în serie, în lipsa unei rezistenţe active, intensitatea $I(t)$ a curentului prin circuit variază după legea $I''(t)+\frac{1}{LC}I(t)=0$, similară cu ecuaţia (6), unde $\omega=\frac{1}{\sqrt{LC}}$.

J.B. Fourier a arătat că orice mişcare periodică este o suprapunere de oscilaţii armonice de diverse frecvenţe.

Notă: În cazul pendulului, perioada oscilaţiilor depinde doar de lungimea pendulului (neglijând diverse frecări, rezistenţa aerului etc.), adică de proprietăţi caracteristice ale pendulului, oarecum intrinseci. Dar amplitudinea oscilaţiilor şi faza depind de condiţiile iniţiale, deci de condiţii externe. De exemplu, dacă $\theta_0=0$, atunci $A=\frac{v_0}{\omega}$ şi $\theta(t)=A\cdot\sin\omega t$. Faza este $\alpha=0$. Viteza iniţială v_0 se poate realiza printr-un „zvâc" sau „impuls". Apoi dacă θ_0 este dat şi $v_0=0$ (pendulul este deci lăsat liber să oscileze de la un anumit unghi θ_0), atunci $\theta(t)=\theta_0(t)\cdot\cos\omega t=\theta_0\cdot\sin(\omega t+\frac{\pi}{2})$, deci faza este $\frac{\pi}{2}$.

O discuţie similară are loc în cazul unui resort, unde frecvenţa oscilaţiilor depinde de masa m a resortului şi de coeficientul său k de rigiditate (deci de condiţii interne ce

caracterizează resortul!). Dar amplitudinea şi faza depind de condiţiile iniţiale, adică de nişte condiţii externe.

Definiţia cinematică indică de la început frecvenţa, amplitudinea şi faza oscilaţiilor, în timp ce definiţia dinamică le maschează!... Dar să nu credem că amplitudinea, de exemplu, este mai puţin importantă. În acest sens, reluăm un exemplu tratat în Cap.1.3.4.

O bilă de masă m este prinsă de două resorturi şi efectuează oscilaţii armonice de amplitudine A. În punctul $x=A$, unde alungirea resortului este maximă, viteza bilei este nulă, iar energia potenţială este egală cu modulul lucrului forţei de revenire $F(x)=kx,\ x\in[0,A]$, adică $\int_0^A kx\,dx=\frac{kA^2}{2}$ (forţa F nu este constantă). Aşadar, energia totală a bilei este proporţională cu pătratul amplitudinii oscilaţiilor.

Dacă c este un punct intermediar ($0<c<A$) şi v este viteza bilei în punctul c, atunci $\frac{kA^2}{2}=\frac{mv^2}{2}+k\cdot\frac{c^2}{2}$ şi se poate afla v. Anume, $v=\sqrt{\frac{k(A^2-c^2)}{m}}$. Viteza maximă este atinsă pentru c=0, având valoarea $v=A\cdot\sqrt{\frac{k}{m}}$. Pe de-altă parte, din definiţia cinematică, rezultă:

$$x(t)=A\sin(\omega t+\alpha),\ v(t)=x'(t)=A\omega\cos(\omega t+\alpha)$$
$$a(t)=v'(t)=-\omega^2x(t).$$

Aşadar, $A\cdot\sqrt{\frac{k}{m}} = A\cdot\omega$, deci $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Aceasta este frecvenţa oscilaţiilor. Viteza maximă şi acceleraţia maximă sunt:

$$v_{\max} = A\cdot\omega = A\cdot\sqrt{\frac{k}{m}};\ a_{\max} = A\cdot\omega^2 = A\cdot\frac{k}{m}. \qquad (7)$$

Exemplu: O bilă cu masa M=2kg este ataşată la un resort şi poate fi deplasată cu A=0,4m în raport cu poziţia de echilibru. Bila este lansată cu viteza iniţială nulă şi k=55N/m. Să se determine energia potenţială a resortului, viteza maximă atinsă de bilă şi viteza când c=0,2 m.

Răspuns:

$$E_p = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}\cdot 55\cdot(0,4)^2 \cong 4,45\text{J};\ v_{\max} = A\cdot\sqrt{\frac{k}{m}} = 0,4\cdot\sqrt{\frac{55}{2}} \cong 2,1\text{m/s}$$

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - c^2)} \cong 1,8\text{m/s}.$$

Notă: În cazul pendulului, „forţa de revenire” este rezultanta forţelor $\vec{G}$, $\vec{T}$, având mărimea $F = mg\sin\theta \cong mg\theta$. Notând $x = l\sin\theta \cong l\theta$, rezultă că $F = mg\frac{x}{l}$, adică $F(x)=kx$, unde $k=\frac{mg}{l}$. Cu aceasta, am demonstrat natura comună a oscilaţiilor unei bile prinse de resorturi şi cele ale unui pendul.

Calculăm acum **energia** totală a pendulului pornit de la înălţimea $h = l - l\cos\theta = l(1-\cos\theta) = 2l\sin^2\frac{\theta}{2}$.

Cum $\sin\theta \cong \theta$, atunci $h = 2l(\frac{\theta}{2})^2 = \frac{l\theta^2}{2}$ şi rezultă:

$E = mgh = mgl\frac{\theta^2}{2} = kl \cdot l \cdot \frac{\theta^2}{2} = kl^2 \cdot \frac{\theta^2}{2}$ şi cum $\theta = \frac{x}{l}$, rezultă $E = \frac{kx^2}{2}$.

Există totuşi o deosebire între „resorturi” şi „pendul”. La resorturi nu se cerea ca abaterea să fie mică. De fapt, ipoteza abaterii mici are ca scop obţinerea unei ecuaţii diferenţiale care să fie integrată (adică având soluţii exprimabile explicit prin funcţii elementare, ceea ce a condus la formule elegante şi simple, de tipul formulei lui Galilei; în cazul general, când $\sin\theta$ nu se înlocuieşte cu θ, se obţin formule mai complicate, iar oscilaţiile nu mai sunt armonice!).

1.3. Oscilaţii forţate şi rezonanţă

Până acum, am văzut că frecvenţa ω_0 a oscilaţiilor pendulului este o caracteristică intrinsecă; dar era vorba de **oscilaţii libere** (≡**proprii**), unde frecvenţa depindea numai de lungimea l a pendulului, nu şi de masa lui [Nu putem „urni” un leagăn cu o altă frecvenţă!]. Aceste oscilaţii sunt cauzate doar de o forţă elastică şi, de aceea, sunt armonice. Dar se pot considera forţe externe, de frecare, care conduc la **oscilaţii forţate** (≡**întreţinute**), cu o frecvenţă ω care poate fi comandată.

Exemplu: Dacă forţa $F(y) = -ky$ din ecuaţia (5) este

suprapusă cu o forţă depinzând de viteză, deci înlocuită cu $F(y) = -ky - \gamma y'$, atunci ecuaţia (5) devine $my''(t) = -ky(t) - \gamma y'(t)$, deci de forma $y'' + 2\alpha y' + \beta y = 0$ cu $\alpha = \dfrac{\gamma}{2m}$ şi se poate arăta că soluţiile ei sunt oscilaţii forţate, având expresia de forma $y(t) = A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, în ipoteza că $\gamma^2 < 4km$. **Amplitudinea instantanee** este $A \cdot e^{-\alpha t}$; această oscilaţie este **amortizată** deoarece $\lim\limits_{t \to \infty} y(t) = 0$, iar α se numeşte constanta de amortizare. Dacă peste noua forţă se suprapune o forţă exterioară sinusoidală, de forma $F_{ext} = F_0 \sin \omega_1 t$ şi frecvenţa ω_1 este apropiată de frecvenţa oscilaţiilor libere, atunci se ajunge la **rezonanţă**, când valorile lui $y(t)$ pot creşte nedefinit pentru $t \to \infty$. De exemplu, pentru ecuaţia $y''+y=0$, cu condiţiile iniţiale $y(0)=0$, $y'(0)=1$, soluţia este $y(t)=\sin t$ (oscilaţie liberă cu frecvenţa $\omega_0=1$). Dar pentru ecuaţia $y''+y=\sin t$, unde apare forţa $F_{ext} = \sin t$, cu aceleaşi condiţii iniţiale, soluţia este $y(t) = \dfrac{1}{2}(3\sin t - t\cos t)$ şi $\lim\limits_{t \to \infty} |y(t)| = \infty$.

<u>Notă:</u> Fenomenul de rezonanţă se întâlneşte în multe procese oscilatorii (mecanice, optice sau electrice), uneori cu efecte nocive. Astfel, o coloană de soldaţi care trecând pe un pod în pas de defilare sau un vânt puternic ar putea provoca oscilaţii forţate care au frecvenţa apropiată de frecvenţa proprie a

oscilaţiilor podului. Este celebru cazul podului Tacoma din SUA, distrus în 1940, ca efect al unor vibraţii forţate.

Există de asemenea, mai multe studii privind influenţa vibraţiilor asupra organismului uman, de exemplu pentru determinarea mişcării articulaţiilor sau suportabilităţii vibraţiilor în automobile, în avion sau în vecinătatea unor utilaje; efectul acestora depinde de frecvenţă şi de durata expunerii.

De exemplu, din studii şi măsurători ergonomice, s-a constatat că sensibilitatea alarmantă a oamenilor are loc la o acceleraţie maximă de circa $0{,}7\times g$ şi o frecvenţă de 16 Hz, când amplitudinea oscilaţiilor este, conform (7), $A=\frac{a_{\max}}{\omega^2}=\frac{0{,}7\times 9{,}81}{256}\cong 3\times 10^{-2}\,\mathrm{m}$.

§ 2. UNDE

Procesul de propagare a modificărilor stărilor unor corpuri se numeşte **undă**. În limbaj mai direct, undele sunt „vibraţii care se deplasează”.

Exemplu: Lovind capătul unei bare metalice, apar compresii locale şi acestea se propagă în bară.

Există mai multe tipuri de unde: unde acustice, unde la suprafaţa unui lac după ce s-a aruncat o piatră, unde elastice, seismice (interne sau de suprafaţă), unde electromagnetice (şi în particular, lumina, la care ne vom raporta pe larg). Pentru a fixa ideile, ne vom referi în continuare la unde elastice.

Dacă într-un mediu – gaz, lichid sau corp solid – esteplasată o **sursă de oscilaţii**, atunci acolo apar unde elastice care se propagă în diverse direcţii. Undele pot fi:

- **transversale** (dacă particulele mediului sunt deviate perpendicular pe direcţia de propagare a undei);

- **longitudinale** (deplasarea particulelor în lungul direcţiei de propagare).

În gaze se propagă unde longitudinale, iar în lichide şi solide, cele transversale şi longitudinale. Trebuie menţionat că undele mecanice nu se propagă în vid, dar undele electromagnetice, se propagă atât în substanţă cât şi în vid. Nu trebuie confundate undele de la suprafaţa apei cu cele din interior. În propagarea undelor într-un anumit mediu, parametrii mediului – densitate, presiune etc. – pot varia sinusoidal şi se spune atunci că avem **unde sinusoidale**.

Caracteristicile principale ale undei sinusoidale (ce depind de mediu) sunt **lungimea de undă** λ, **perioada** T a oscilaţiilor, **frecvenţa** f şi **viteza de propagare** v.

$$\lambda = v \cdot T \text{ şi } T = \frac{1}{f}. \qquad (8)$$

Se mai folosesc $\omega = 2\pi f$ (**frecvenţa circulară**) deci $T = \frac{2\pi}{\omega}$; λ=distanţa parcursă de undă într-o perioadă; apoi $f = \frac{v}{\lambda}$.

Exemple: 1) O undă propagată în lungul unei corzi întinse parcurge 5 m în 0,1 s. Care sunt viteza de propagare şi

frecvenţa dacă lungimea de undă este de 0,5 m?

Răspuns: $v \cong \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{5}{0,1} = 50\text{m/s}$; apoi $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{50}{0,5} = 100\text{Hz}$.

2) O persoană normală percepe sunete cu frecvenţe între 20 şi 20000 Hz. Care sunt lungimile de undă respective? Dar în cazul unui liliac, unde f=120 000Hz?

Răspuns: În aer, viteza sunetului este $v \cong 340$ m/s. Dar $\lambda = \frac{v}{f}$, deci pentru f=20Hz, $\lambda = \frac{340}{20} = 17\text{m}$ şi pentru f=20000Hz, $\lambda \cong 1,7\text{cm}$. La liliac, $\lambda = \frac{340}{120000} \cong 0,28\text{cm}$.

Să presupunem că o undă nenulă este generată de o sursă de oscilaţii armonice având perioada T şi se propagă în lungul unei coarde vibrante, pe axa Ox, cu viteza v. Ne propunem să scriem ecuaţia acestei unde, adică dependenţa abaterii (devierii) faţă de Ox a particulelor mediului, dependenţa fiind de coordonate spaţiale şi de timp.

Plasăm în punctul x=0 o sursă de oscilaţii armonice, a căror abatere la momentul t_1 este $y_1 = A \cdot \sin \omega t_1$, cu $A \neq 0$. În punctul x>0, unda ajunge după timpul $\frac{x}{v}$, deci la momentul

$t_1 + \frac{x}{v}$. Să notăm cu $y(x, t)$ abaterea în punctul x şi la momentul t.

Această abatere se constată în punctul x=0 la momentul $t - \frac{x}{v}$.

Ca atare, $y(x,t) = A\sin\omega(t - \frac{x}{v})$.

Dar $\omega\frac{x}{v} = \frac{2\pi}{T}\cdot\frac{x}{\lambda / T} = \frac{2\pi x}{\lambda}$, deci $y(x,t) = A\sin(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})$.

Notăm $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (numit **număr de undă**). Aşadar,

$$y(x,t) = A\sin\omega(t - kx) \qquad (9)$$

Aceasta este **ecuaţia undelor armonice plane**; x=distanţa de la sursă la punctul curent al undei, iar $\omega t - kx$ se numeşte **faza undei**.

Dacă unda se propagă <u>nu</u> în sensul pozitiv al axei Ox, ci în sens contrar, atunci trebuie schimbat doar semnul vitezei, deci $y(x,t) = A\sin(\omega t + kx)$. Iar dacă în lungul axei Ox se propagă două unde la fel, care vin din sensuri diferite, atunci suprapunerea lor are expresia:

$$y(x,t) = A\sin(\omega t + kx) - A\sin(\omega t - kx) = 2A\sin kx \cdot \cos\omega t .$$

Fenomenul suprapunerii undelor se mai numeşte **interferenţă**. Unda astfel obţinută are amplitudinea de două ori mai mare, cu excepţia punctelor unde sin kx=0 (adică $kx = m\pi,\ m \in \mathbb{Z}$, deci $x = \frac{m\pi}{k} = \frac{m\lambda}{2}$, deci $x = \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \ldots$), unde amplitudinea undei este nulă la orice moment t. Aşadar,

aceste unde au puncte fixe, numite **noduri**, iar undele se zic **staţionare**. Celelalte tipuri de unde se numesc **progresive** şi graficul lor arată ca în figura 5.4.

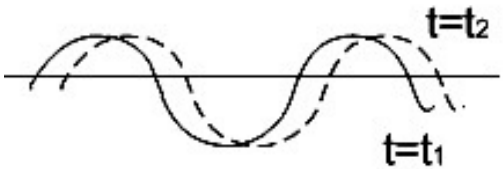


Fig. 5.4

<u>Notă:</u> Prin derivare, funcţia $y(x,t)$ dată de (9) satisface relaţia $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$, numită **ecuaţia undelor**, dar nu insistăm.

Să considerăm o <u>coardă elastică de lungime</u> L, având ecuaţia:

$$y(x,t) = 2A\sin kx \cdot \cos\omega t, \forall t \geq 0,\ x \in [0, L], \qquad (10)$$

obţinută prin suprapunerea şi interferenţa menţionate anterior. În plus, presupunem că această coardă este prinsă la capete, adică pentru orice t, $y(0,t)=0$ şi $y(L,t)=0$; atunci $2A\sin kx \cdot \cos\omega t = 0$ deci $\sin kL = 0$. Aşadar, $kL = n\pi$, $n \in \mathbb{Z}$, adică $\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L = n\pi$, deci

$$L = \frac{n\lambda}{2},\ n \geq 1 \qquad (11)$$

deci lungimea corzii este un multiplu întreg al semilungimii de undă.

Undele având lungimile de undă $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ şi frecvenţele $f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v \cdot n}{2L}$ se numesc **armonicele coardei**; pentru n=1 se obţine **armonica fundamentală**.

Ecuaţiile lor se obţin luând în (10), $k = \frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{\pi \cdot n}{L}$, deci $y_n(x,t) = 2A\sin\frac{n\pi x}{L} \cdot \cos\omega t = 0,\ n \geq 1$. Pentru fiecare t fixat, graficele lor arată ca în figura 5.5.

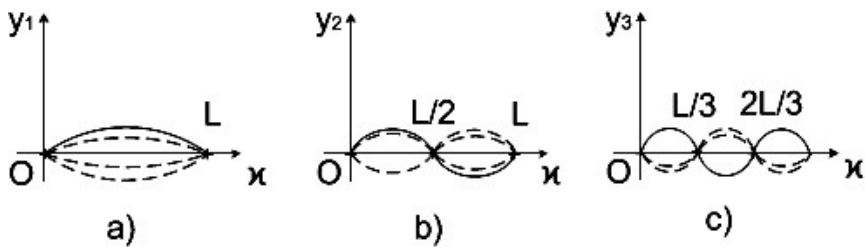


Fig. 5.5

Fiecare armonică y_n are n+1 noduri (puncte unde y_n se anulează) şi n ventre (puncte de maxim sau minim).

<u>Exemple:</u> 1) Care sunt frecvenţele primelor trei armonici ale corzii celei mai lungi a unui pian? [Se dau L=1,98m şi v=130m/s].

<u>Răspuns:</u> Frecvenţa lui y_n este $f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v \cdot n}{2L}$. Dar

$$\frac{v}{2L}=\frac{130}{2\times 1{,}98}\cong 32{,}8\text{, şi } f_1=32{,}8\text{Hz}; f_2=2f_1=65{,}6\text{Hz}, f_3=3f_1.$$

2) Viteza de propagare a unei unde într-o coardă de vioară este v=300 m/s şi lungimea L=0,5 m. Dacă violonistul apasă pe acea coardă la mijlocul ei, se produce un nod. Care este frecvenţa cea mai joasă care se poate produce?

Răspuns: Frecvenţa cea mai joasă corespunde lungimii de undă celei mai mari; dacă la mijocul corzii se produce un nod, armonica y_2 este cea căutată. În acest caz, n=2 şi conform (11), $\lambda_2=L, f_2=\frac{v}{\lambda_2}=\frac{v}{L}=\frac{300}{0{,}5}=600\text{Hz}$.

2.1. Bătăi

Să considerăm două unde progresive cu frecvenţe diferite f_1, f_2 şi având aceeaşi amplitudine şi lungime de undă; notând $\omega_1=2\pi f_1$, $\omega_2=2\pi f_2$, conform (9), ecuaţiile lor ar fi $y_1(x,t)=A\sin(\omega_1 t-kx)$, $y_2(x,t)=A\sin(\omega_2 t-kx)$.

Conform principiului suprapunerii, al adunării, efectul lor comun este dat de unda:

$$y(x,t)=y_1(x,t)+y_2(x,t)=2A\cos(\frac{\omega_1-\omega_2}{2}t)\sin(\frac{\omega_1+\omega_2}{2}t-kx).$$

Amplitudinea acestei unde este $\alpha(t)=2\left|A\cos(\frac{\omega_1-\omega_2}{2}t)\right|=2|A||\cos\pi(f_1-f_2)t|$ şi este maximă

la momentele t când $\pi(f_1 - f_2)t = n\pi,\ n \in \mathbb{Z}$. Modul de variaţie a acestei amplitudini este indicat în figura 5.6. Momentele la care $\alpha(t)$ atinge valoarea maximă se numesc momentele când apar **bătăi**; acestea sunt $t_n = \dfrac{n}{f_1 - f_2}$ şi depind de frecvenţele undelor iniţiale. Frecvenţa bătăilor este $f_B = |f_1 - f_2|$.

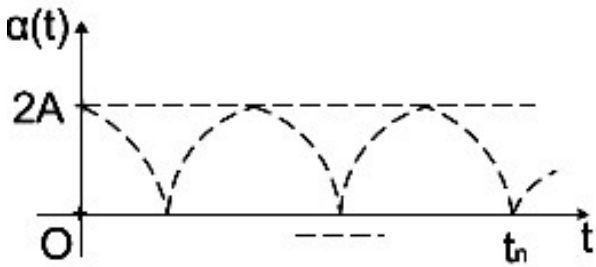


Fig. 5.6

Exemplu: Un diapazon are frecvenţa de 400 Hz şi este pus în vibraţie simultan cu o coardă de vioară. Dacă se percep bătăi cu frecvenţa f_B=10 Hz, la ce frecvenţă vibrează coarda de vioară?

Răspuns: Notăm cu f_1 frecvenţa diapazonului şi cu f_2 frecvenţa corzii de vioară. Atunci $|f_1 - f_2|$=10 şi cum f_1=400, rezultă că f_2=390 sau 410 Hz.

Fenomenul bătăilor este utilizat la acordarea instrumentelor muzicale.

Notă: Există multe alte proprietăţi legate de studiul undelor – reflexia, refracţia, absorbţia, ecoul, difracţia, dispersia

- unele din aceste vor fi adâncite în cazul luminii, dar nu într-un cadru general.

2.2. Sunete (unde sonore)

Definiţie: **Sunetul** este numele dat vibraţiilor mecanice în medii elastice şi în diverse corpuri solide, lichide sau gazoase, cu frecvenţe între 17 şi 20000 Hz. Aceste frecvenţe ale vibraţiilor mecanice produc **senzaţia sonoră** (≡sunet) în urechea umană.

Sub 17 Hz se obţin **unde subsonice** (≡**infrasunete**) şi peste 20000 Hz, **ultrasunete**.

Exemple: 1) Orice activitate mecanică este urmată de o emisie sonoră. De exemplu, arderea de combustibil într-un motor.

2) Tunete, cutremure, explozii submarine ...

3) O sursă sonoră remarcabilă o constituie instrumentele muzicale sau vocea umană, având o mare diversitate de principii de funcţionare.

Corzile viorii (violoncelului, contrabasului) sunt puse în vibraţie de interpret şi vibraţiile sunt transmise în atmosferă; în vid, sunetele nu se propagă. Însăşi cutia de rezonanţă a instrumentului vibrează, astfel încât volumul ei să varieze şi aerul să fie aspirat şi expulzat succesiv prin orificii; frecvenţele de rezonanţă ale cutiei pot coincide cu frecvenţele corzilor.

La oameni, corzile vocale declanşează vibraţia aerului, iar gâtlejul şi cavitatea buco–nazală formează de asemenea o structură rezonantă.

Definiţie: **Unda sonoră** este propagare în mediu, prin comprimări şi rarefieri ale mediului respectiv. În fiecare punct al mediului se produc modificări de presiune, undele fiind purtătoare de energie: energia potenţială de deformare elastică (de exemplu, deformarea aerului atmosferic) şi energia cinetică a particulelor mediului.

Sunetele şi undele sonore se caracterizează prin câţiva parametri: intensitate (tărie), înălţime şi timbru.

Definiţie: **Intensitatea** *I* a unei unde sonore, măsurată în W/m^2, este energia transmisă într-o secundă printr-o suprafaţă de 1 m^2, perpendicular pe direcţia de propagare.

Intensitatea este proporţională cu pătratul amplitudinii vibraţiilor sonore. **Înălţimea** sunetului depinde de frecvenţă ; cu cât frecvenţa este mai mare, cu atât sunetul este mai înalt. **Timbrul** depinde de amplitudinea vibraţiilor cu frecvenţe înalte şi de profilul undei.

Undele sonore sinusoidale se numesc **tonuri simple**. Ele sunt inexpresive muzical. În figura 5.7. indicăm profilul a trei unde transversale având aceeaşi intensitate şi înălţime, dar având un timbru diferit.

În cazul a) avem un ton simplu; în b) – timbrul pianului şi în c) – timbrul viorii.

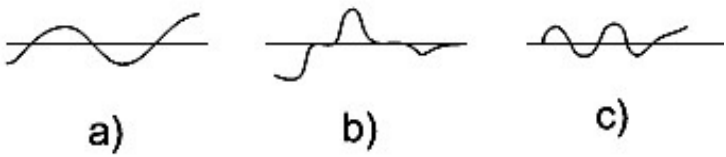


Fig. 5.7

Nivelul de intensitate a sunetului

Viteza sunetului în aer este de circa 340 m/s, dar în apă atinge 1400 m/s; în atmosferă de CO_2 viteza este de 260 m/s, iar în fier sau aluminiu, depăşeşte 4000 m/s.

Se poate arăta că intensitatea I şi presiunea sonoră, datorate propagării undelor sonore, sunt legate printr-o relaţie de forma $I \cong p_0^2 / 2\rho \cdot v$, unde p_0 este amplitudinea presiunii sunetului, ρ este densitatea mediului şi v viteza sunetului în mediul respectiv.

Exemplu: S-a constatat experimental că presiunea sonoră maximă suportabilă de urechea umană ("pragul de durere") este 29Pa. Cunoscând densitatea aerului ρ=1,29 kg/m^3, atunci valoarea maximă admisă pentru intensitatea I este

$$I \cong \frac{29^2}{2 \times 1{,}29 \times 340} \cong 1 \text{ W/m}^2 \qquad (12)$$

Pragul minim de audibilitate pentru urechea umană este $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2. Această valoare este numită **nivelul de referinţă** pentru a exprima cea mai mică intensitate perceptibilă.

Definiţie: **Nivelul de intensitate** al unui sunet, măsurat pe o scară logaritmică în decibeli, este $\beta = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0}$.

Aşadar, $\beta = 10 \cdot (\lg I - \lg I_0) = 10 \cdot (\lg I + 12)$, adică

$$\beta = 10 \cdot \lg I + 120. \qquad (13)$$

Mărimea β este numită **numărul de decibeli** pentru un sunet cu intensitatea *I*. Denumirea este adoptată în onoarea fizicianului american A.G. Bell, inventatorul telefonului.

Deoarece $I_0 \le I \le 1$ (conform (12)), se pot considera următoarele nivele: β=0; 10^{-11}; 10^{-10}; ... 10^{-1}; 1, sintetizate în tabelul următor, unde pe cele trei coloane sunt trecute valorile lui *I* (în W/m^2), β (în dB) şi o descriere subiectivă a nivelului respectiv de zgomot resimţit de o ureche umană normală.

Exemplu: Dacă o intensitate *I* se dublează, atunci numărul de decibeli creşte cu 3 dB.

Într-adevăr, dacă $\beta = 10 \cdot \lg I + 120$, $\beta_1 = 10 \cdot \lg(2I) + 120$, atunci $\beta_1 - \beta = 10 \cdot \lg 2 \cong 3$.

Pentru β>120 dB (adică *I*>1 W/m^2), resimţim o durere fizică insuportabilă, cu riscul de a se sparge timpanul.

Notă: Conform (13), 1dB corespunde valorii $I = 10^{-11,9} \cong 1,26 \times 10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}$. Decibelii sunt folosiţi şi într-un alt context. Astfel, dacă *r*>0 este un raport între o putere emisă şi una absorbită, atunci se defineşte decibelul respectiv ca fiind $1\mathrm{dB} = 10 \cdot \lg r$.

I [W/m^2]	β [dB]	Nivel resimţit
$I_0=10^{-12}$	0	Prag minim de audibilitate
10^{-10}	20	Discuţie în şoaptă, foşnet de frunze
10^{-8}	40	Discuţie sau muzică normală la radio
10^{-6}	60	Zgomot auto, zgomotul străzii
10^{-4}	80	Vorbire tare sau stradă zgomotoasă sau orchestră
10^{-2}	100	Sirena pompierilor sau a poliţiei
10^{-1}	110	Bormaşină, avion apropiat
1	120	Explozie puternică

Efectul Dopler – Fizeau

Dacă prin faţa noastră trece cu viteză un tren sau o maşină de salvare, frecvenţa sunetului sirenei coboară după trecere. Acest efect se produce deoarece dacă sursa de zgomot se apropie, atunci fronturile de undă care ne ating sunt mai numeroase în unitatea de timp, decât ale celor emise în aceeași unitate de timp. Efectul are loc şi pentru alte tipuri de unde, nu numai în Acustică.

Să presupunem că ne îndepărtăm de o sursă de sunet cu viteza v_0 şi că la momentul t_1 ajunge la noi abaterea maximă (≡vârful) undei sonore, iar noi suntem în punctul x_1. Următorul vârf ajunge la noi la un moment $t_1+\tau$ şi noi vom fi în punctul $x_1+\tau v_0$. Datorită mişcării noastre recepţionăm mai puţine unde în unitatea de timp. Dacă f este frecvenţa oscilaţiilor, λ

lungimea de undă şi v este viteza sunetului, atunci recepționăm cu $\frac{v_0\tau}{\lambda}$ mai puține unde în același timp τ.

Dacă f este frecvenţa adevărată a sunetului şi f' frecvenţa sunetului perceput de noi, atunci f' este egală cu numărul de unde recepționate în unitatea de timp, adică, $f' = \frac{v\tau/\lambda - v_0\tau/\lambda}{\tau} = \frac{v - v_0}{\lambda} = \frac{v - v_0}{v/f} = f\frac{v - v_0}{v}$, în concluzie

$$f' = f(1 - \frac{v_0}{v}),\ \omega' = \omega(1 - \frac{v_0}{v}) \qquad (14)$$

Aşadar, dacă ne depărtăm de sursa sunetului, atunci vom auzi un sunet mai jos, cu frecvenţa dată de relaţia anterioară, iar dacă ne apropiem de sursă, auzim un sunet mai înalt, cu frevenţa $f' = f(1 + \frac{v_0}{v}),\ \omega' = \omega(1 + \frac{v_0}{v})$.

Acelaşi efect apare dacă se mişcă nu observatorul ci sursa de zgomot. Dacă sursa se îndepărteză de observator, acesta aude o frecvență micșorată, anume $f' = f\frac{v}{v + v_0}$, așadar relația generală valabilă atunci când observatorul este în repaus față de mediu și sursa se mișcă față de mediu este $f' = f\frac{v}{v \mp v_0}$. Dacă atât sursa cât și observatorul se mișcă prin mediu care transmite sunetul, observatorul aude o frecvență: $f' = f\frac{v \pm v_0}{v \mp v_0}$.

Importantă este mişcarea relativă a sursei şi observatorului. Acesta este efectul Dopler–Fizeau.

Exemplu: O maşină de poliţie are o sirenă cu frecvenţa f'=800 Hz şi se deplasează cu viteza v_0=12m/s. Care este frecvenţa sunetului perceput de un observator fix atunci când maşina se depărtează de observator? Dar dacă se apropie?

Răspuns: Din formula (14) rezultă $f = f'\dfrac{v}{v \pm v_0}$, unde v este viteza sunetului în aer.

În primul caz $f = 800 \cdot \dfrac{340}{340+12} \cong 773\text{m/s}$, şi în cazul secund $f = 800 \cdot \dfrac{340}{340-12} \cong 829\text{m/s}$.

Notă: Efectul Dopler–Fizeau are loc în orice proces de propagare de unde, de orice natură.

De exemplu, dacă o sursă de lumină se depărtează de noi, atunci frecvenţa undei luminoase se micşorează (iar lumina galbenă pare roşie).

Dar undele luminoase se propagă cu viteze enorme şi practic nu putem sesiza variaţiile de frecvenţă ale luminii.

Totuşi, astronomii şi astrofizicienii au surprins variaţia de frecvenţă a luminii din studiul radiaţiei stelelor. (De exemplu, prin deplasarea spectrului radiaţiei stelare spre lumina roşie, ei au dedus că steaua studiată se depărtează de noi!).

§ 3. PROPRIETĂŢILE ONDULATORII ALE LUMINII

Teoria corpusculară a luminii a explicat fenomenele de refracţie (adică deviere a razelor de lumină la trecerea prin suprafaţa de separare a două medii), dar nu şi proprietatea de a „ocoli" obstacolele, ca în cazul undelor sonore sau a undelor/ valurilor care se propagă pe suprafaţa unui lac. Faptul că este imposibil să vedem o sursă luminoasă plasată în spatele unui obstacol netransparent se opune naturii corpusculare, dar nu şi celei ondulatorii a luminii, după ce s-au descoperit efectele interferenţei şi faptul că razele de lumină sunt deviate în jurul unor obiecte.

După 1850, s-a impus teoria electromagnetismului Maxwell–Hertz, iar modelul ondulatoriu al luminii a fost deplin acceptat; acesta a permis explicarea diverselor fenomene – dispersie, difracţie, polarizare, la care ne referim în acest paragraf. În secolul al XX-lea a apărut teoria cuantică; anume, lumina este formată din fotoni – unde luminoase care transportă energie proporţională cu frecvenţa acelor unde.

Fotonii reunesc caracterul ondulatoriu cu cel corpuscular asociat distribuţiei discrete a energiei lor şi au permis explicarea altor fenomene, precum absorbţia luminii.

3.1. Principiul lui Huygens şi interferenţa undelor

Mai multe mişcări vibratorii având aceeaşi frecvenţă şi pentru care se ating, la aceleaşi momente, amplitudini maxime, se numesc **mişcări în fază** (figura 5.8).

Fronturile de undă sunt suprafeţele formate din punctele în care oscilaţiile sunt în fază, depărtându-se de sursă cu viteza de propagare a undei.

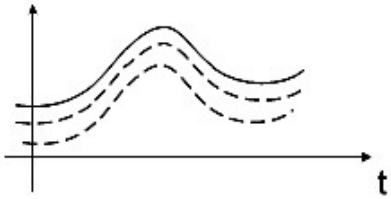


Fig. 5.8

În figura 5.9,a) se redă un front de unde 3D sferice (de exemplu, unde sonore la care sursa este un generator punctual de sunete) şi în fig. 5.9,b) – un front de unde plane, orientat într-un singur sens (de exemplu, vibraţiile unui burduf).

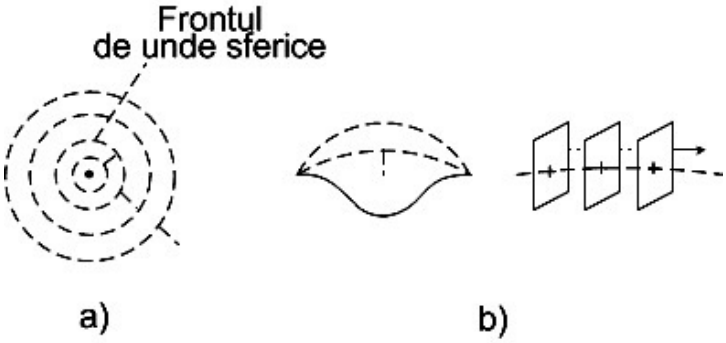


Fig. 5.9

Principiul lui Huygens afirmă că „fiecare punct al unui front de undă sferică, deci undă 3D (tridimensională), se poate considera ca sursă a unor unde sferice aflate în fază cu unda incidentă”.

Aşadar, domeniul de influenţă al unui punct din spaţiu este format dintr-o suprafaţă sferică în expansiune; în cazul 2D acest domeniu este un întreg „disc” şi nu doar frontiera discului. De altfel, în 3D acţiunea unui sunet asupra urechii noastre încetează după ce a trecut frontul de undă. Dar undele 2D observate la suprafaţa unui lac la aruncarea unei pietre au un front anterior, creând valuri/cute şi un front posterior care nu încetează brusc ci se amortizează lent până la anulare.

Principiul lui Huygens nu are loc în cazul undelor 2D şi nici 1D (de exemplu, o coardă vibrantă prinsă la un capăt).

Nu întâmplător se pot transmite semnale de înaltă fidelitate doar în 3D, cu ajutorul sunetului, luminii, undelor radio sau altor unde electromagnetice.

Notă: Undele sferice 3D au funcţia de undă de forma $\psi(x,y,z,t) = h(r)\cdot\varphi(r-at)$, unde $r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$, $a>0$ o constantă, h=factorul de atenuare şi φ forma de undă. Această funcţie satisface ecuaţia undelor. Nu dăm detalii, care depăşesc cadrul acestei cărţi.

Interferenţa undelor este fenomenul de suprapunere a două sau mai multe oscilații aflate în fază, într-o anumită regiune. Ca o consecinţă a interferenţei, creşte amplitudinea undei rezultate; în cazul particular al luminii, creşte intensitatea luminoasă în regiunea respectivă. Dacă două surse de oscilaţii au aceeaşi frecvenţă şi menţin diferenţa de fază constantă în timp, atunci se spune că undele sunt **coerente** şi interferenţa este staţionară, adică are loc pe un interval mai mare de timp. Există

dispozitive speciale care au ca scop obţinerea de unde coerente (de exemplu, lamele cu feţe plane paralele care permit divizarea amplitudinii).

3.2. Difracţia luminii

Acest fenomen se referă la ocolirea obstacolelor sau fantelor din calea razelor de lumină. Difracţia are loc şi pentru alte tipuri de unde; de exemplu, 3D sonore sau la unde electromagnetice (raze X, unde radio), dar şi la particule de materie (electroni, neutroni, protoni). O explicaţie a fenomenului de difracţie se poate obţine aplicând principiul lui Huygens.

Exemplu: Considerând valuri de apă (ca unde staţionare) îndreptate spre o barieră ca în figura 5.10, se constată că acestea se curbează şi se împrăştie dincolo de barieră.

Fenomenul depinde de dimensiunea deschiderii şi de lungimea de undă. Difracţia constă tocmai în suprapunerea de unde care trec printr-un orificiu sau se refac după depăşirea unui obstacol.

Fenomenul de difracţie apare în diverse situaţii concrete. De exemplu, particulele fine din atmosferă creează în jurul unei surse puternice de lumină inele/halouri circulare; apoi umbra unui obiect mat produce mici franjuri în jurul marginilor acelui obiect. În proiectarea instrumentelor optice – aparate foto, telescoape, microscoape etc. - se ţine seama de limitările generate de difracţie.

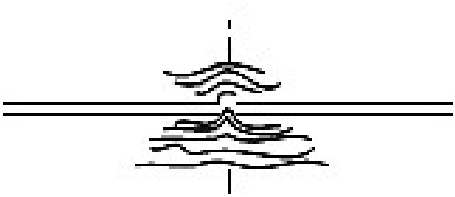


Fig. 5.10

3.3. Interferenţa luminii

Să considerăm două surse luminoase coerente. Fie P punctul aflat la distanţele r_1, r_2 de cele două surse.

Atunci suprapunerea lor va da într-un punct P o oscilaţie de forma $y(P,t) = A\sin(\omega t - kr_1) + A\sin(\omega t - kr_2)$, unde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Aşadar, $y(P,t) = 2A\sin(\omega t - kr_m)\cdot\cos\frac{ku}{2}$, unde $r_m = \frac{r_1 + r_2}{2}$ şi $u=r_2-r_1$.

Această oscilaţie rezultantă în P are amplitudinea maximă (adică **un ventru**) dacă $\left|\cos\frac{ku}{2}\right| = 1$, adică $\sin\frac{ku}{2} = 0$, deci $k\frac{u}{2} = m\pi,\ m \in \mathbb{Z}$, ca atare $\frac{2\pi}{\lambda}\cdot\frac{u}{2} = m\pi$, aşadar $u = m\lambda$.

Oscilaţia rezultată este nulă în P dacă $\cos\frac{ku}{2}=0$, $\frac{ku}{2} = \frac{\pi}{2} + m\pi$ şi $u = (2m+1)\frac{\lambda}{2},\ m \in \mathbb{Z}$.

Medicul englez Thomas Young a construit un dispozitiv care probează fenomenul de interferenţă a undelor luminoase.

Acest dispozitiv constă dintr-un paravan opac E' cu două fante înguste F_1, F_2, simetrice faţă de axul optic principal pe care se află o sursă S de lumină monocromatică (de exemplu, roşie), figura 5.11. După trecerea printr-o lentilă convergentă L, razele de lumină trec prin fantele F_1, F_2 şi pot ajunge într-un punct P situat pe un ecran E. Se îndeplinesc condiţiile anterioare.

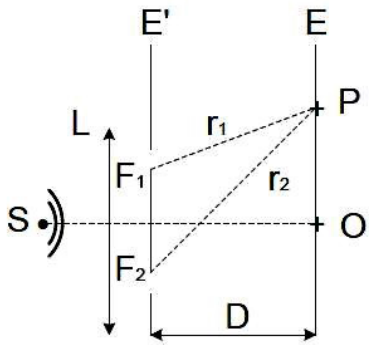


Fig. 5.11

Pe ecranul E se obţine un şir de benzi/franjuri luminoase care alternează cu benzi mai întunecate, în funcţie de valorile diferenţei $u=r_1-r_2$; dacă acestea sunt multipli întregi ai lui λ, atunci benzile sunt luminoase, de diverse ordine m (dacă $u=m\lambda$), deoarece P este un ventru; iar dacă u este un număr impar de semilungimi de undă, atunci benzile vor fi întunecate fiindcă în P oscilaţia este nulă (se spune că este **un nod**).

Se poate determina distanţa OP. Notând cu D distanţa între planele E şi E' şi dacă $F_1F_2=2a$, atunci teorema lui Pitagora arată că $r_1^2 = D^2 + (OP - a)^2$ şi $r_2^2 = D^2 + (OP + a)^2$. Aşadar, $r_2^2 - r_1^2 = 4a \cdot OP$.

Deoarece $r_2 + r_1 \cong 2D$, rezultă $r_2 - r_1 = \frac{2a \cdot OP}{D}$. În punctul P se obţine maximul luminos de ordin m dacă $r_2 - r_1 = m\lambda$, adică $OP = \frac{D \cdot m \cdot \lambda}{2a}$; similar, se obţine o franjă întunecată de ordin m dacă $OP = \frac{D \cdot (2m+1) \cdot \lambda}{4a}$.

Interfranja, adică distanţa între două ventre (sau noduri) succesive, este $\frac{D \cdot m \cdot \lambda}{2a} - \frac{D \cdot (m-1) \cdot \lambda}{2a} = \frac{\lambda \cdot D}{2a}$. Aşadar, franjele de interferenţă obţinute pe ecranul E sunt nişte benzi paralele între ele, echidistante, cele luminoase alternând cu cele întunecate.

Notă: Dacă s-ar utiliza o sursă de lumină albă, s-ar constata pe ecran o franjă centrală albă mărginită de două franje întunecate şi apoi apar franje colorate dispuse de o parte şi alta a maximului luminos central, începând cu violet şi terminând cu roşu.

3.4. Dispersia luminii

S-a constatat că lumina albă (≡solară) este alcătuită din componente cu lungimi de undă întinse pe întreg spectrul de frecvenţe. Pe de altă parte, s-a verificat experimental că indicele de refracţie al oricărui material (sticlă, plastic, lichid) variază cu lungimea de undă a luminii. În Capitolul 4, § 1.1, am definit indicele de refracţie al unui mediu omogen neopac ca fiind

$n = \frac{c}{v}$, unde c este viteza luminii în vid şi v=viteza luminii în acel mediu. Apoi, v şi lungimea de undă a luminii sunt legate prin relaţia (8), anume $\lambda = \frac{v}{f}$. Aşadar, din ultimele relaţii, rezultă că $f \cdot \lambda = \frac{c}{n}$. Dacă avem două componente ale luminii cu lungimile de undă λ_1, λ_2, atunci $f \cdot \lambda_1 = \frac{c}{n_1}$, $f \cdot \lambda_2 = \frac{c}{n_2}$, de unde rezultă relaţia

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_1}{n_2}. \qquad (15)$$

Aşadar, dacă $\lambda_1 < \lambda_2$, atunci $n_1 > n_2$, deci <u>indicele de refracţie creşte dacă lungimea de undă scade.</u>

Cu 300 de ani în urmă, Newton a descoperit, cu ajutorul unei prisme de sticlă, că lumina albă este formată din mai multe fascicule având diverse culori. Prisma este un mediu omogen şi transparent, mărginit de două feţe S_1, S_2 plane neparalele (figura 5.12). Lumina albă incidentă se separă într-un fascicul divergent, al cărui impact pe un ecran produce un curcubeu de culori.

La trecerea prin prismă, lumina se descompune în fascicule colorate în 7 culori: roşu, portocaliu, galben, verde, albastru, indigo şi violet, care au lungimi de undă diferite şi trec prin prismă cu viteze diferite; ca atare, ele ies din prismă sub unghiuri diferite.

Se poate arăta că trei din cele 7 culori sunt de bază – roşu, verde şi albastru, celelalte putând fi obţinute prin „dozări” corespunzătoare ale celor trei culori. Lungimea de undă a

luminii violet este $\lambda_v \cong 400$ nm („nanometri”), iar a celei roşii este $\lambda_r \cong 760$ nm.

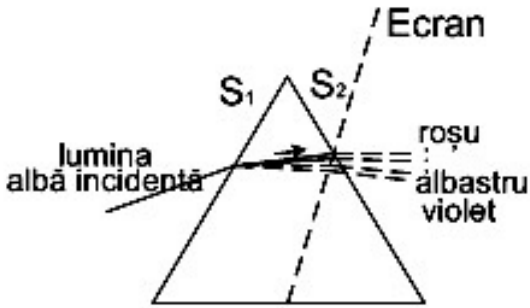


Fig. 5.12

Conform relaţiei (15), indicii de refracţie sunt în relaţia $n_r < n_v$ şi conform legii lui Snell (3) din Cap. 4. §1, rezultă că raza violet este mai puternic deviată decât cea roşie.

Curcubeul este un fenomen impresionant care este o ilustrare tocmai a descompunerii spectrale şi a dispersiei luminii solare prin picăturile de ploaie (care joacă rolul prismei!). Picăturile de apă sunt mici sfere şi ele separă razele roşii, galbene, albastre, violete etc. după multiple refracţii. Vârful curcubeului este roşu.

§ 4. UNDE ELECTROMAGNETICE

4.1. Oscilaţii electrice

Cel mai des utilizat curent alternativ (unde intensitatea curentului şi tensiunea sunt variabile în timp) este cel sinusoidal. Curentul este dat de formula $I(t) = I_0 \cdot \sin \omega t$ şi tensiunea este $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, unde I_0 şi $\mathbf{E}_0$ sunt amplitudinile (valorile

maxime) respective, ω este pulsaţia şi φ diferenţa de fază între curent şi voltaj (tensiune). Valorile lor efective sunt, conform formulei (30) din Capitolul 3. §6, egale cu $I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ şi $U = \frac{\mathbf{E}_0}{\sqrt{2}}$.

Puterea medie dezvoltată de curentul alternativ este $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$, unde $\cos\varphi$ este numit **factorul de putere**.

Variaţiile oscilatorii ale curentului sau voltajului într-un circuit electric se numesc **oscilaţii electrice**. Am studiat în Capitolul 3, §6 circuitele electrice în curent alternativ şi acum reamintim pe scurt câteva elemente.

O bobină cu inductanţa L funcţionează în mod similar cu o rezistenţă în circuit. Reactanţa inductivă este $X_L = L \cdot \omega$ (conform formulei (34) din Capitolul 3, §6.2) şi este datorată f.e.m. de autoinducţie din bobină. Un curent alternativ într-un circuit care conţine doar o reactanţă inductivă este decalat în fază cu $\frac{\pi}{2}$ în urma tensiunii. Un condensator într-un circuit electric în curent alternativ lasă să treacă curentul (în contrast cu curentul continuu direct) şi rezistenţa lui la fluxul curentului alternativ este numită reactanţă capacitivă, egală cu $X_C = \frac{1}{C \cdot \omega}$ (conform formulei (33) din Capitolul 3, §6.2); în acest caz, curentul devansează tensiunea cu $\frac{\pi}{2}$. Dacă o rezistenţă ohmică, împreună cu reactanţă capacitivă şi una inductivă sunt conectate

în serie, am văzut că acţiunea lor comună este dată de impedanţa $Z = (R^2 + (X_L - X_C)^2)^{1/2}$, conform formulei (36) din Cap. 3, §6.3. Amplitudinea curentului într-un circuit RLC în serie este $I_0 = \frac{U}{Z}$. Diferenţa de fază φ între curent şi tensiune este dată de formula (37) din Capitolul 3, §6.2, anume, $\mathrm{tg}\,\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$ şi $\cos\varphi = \frac{R}{Z}$ (conform figurii 3.50). Dacă $X_L = X_C$, atunci φ=0 şi impedanţa *Z* este minimă, iar curentul *I* este maxim; în acest caz, circuitul se află <u>în rezonanţă</u> cu sursa $\mathbf{E}(t)$.

4.2. <u>Circuitul oscilant al lui Hertz</u>

Un circuit închis, în serie, conţinând un inductor cu inductanţa *L* şi un condensator cu capacitatea *C* (constante) se numeşte **circuit oscilant** (≡**oscilator**) Hertz, generator de oscilaţii de înaltă frecvenţă (figura 5.13). Hertz a avut intuiţia genială, conform căreia cele mai simple variaţii în timp, care se întreţin timp îndelungat şi staţionar, sunt oscilaţiile.

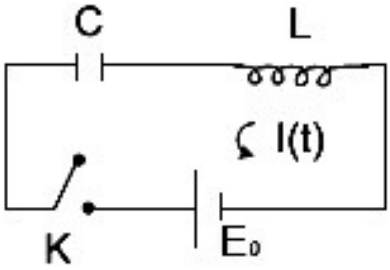


Fig. 5.13

Prin închiderea întrerupătorului K, se stabileşte rapid în circuit un curent electric, deşi condensatorul întrerupe curentul (fiind alcătuit din armături conductoare separate de un dielectric izolator); totuşi un curent electric există, dar nu unul de conducţie, ci un "curent de deplasare" (drift); acesta nu reprezintă un transport de sarcini electrice, ci creează un câmp magnetic, fără efecte termice.

Notând cu $U(t)$ tensiunea la armăturile consensatorului şi cu $V(t)$ tensiunea prin bobină şi aplicând legea K_{II} a lui Kirchhoff (căderea de tensiune la bornele circuitului este egală cu suma căderilor de tensiune prin bobină şi condensator), rezultă $U(t)+V(t)=\mathbf{E}_0$.

Dar $V(t)=L\cdot I'(t)$ conform relaţiei (27) din Cap.3, §5.3 şi $U(t)=\frac{1}{C}q(t)$, unde $q(t)$ este sarcina de pe o armătură a condensatorului la momentul t. Aşadar, $L\cdot I'(t)+\frac{1}{C}q(t)=\mathbf{E}_0$.

Derivând această relaţie şi ţinând cont de formula (6) din Cap. 3, §2.1 ($q'(t)=I(t)$), rezultă $L\cdot I''(t)+\frac{1}{C}I(t)=0$, deci

$$I''(t)+\frac{1}{LC}I(t)=0\text{, la orice moment } t. \qquad (16)$$

Aceasta este o ecuaţie diferenţială de tipul (3), unde $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Am văzut că soluţiile ei sunt de forma $I(t) = A\sin\omega t + B\cos\omega t$, cu A, B constante reale arbitrare.

Punând condiţia $I(0)=0$, rezultă $B=0$ deci soluţiile sunt de forma $I(t) = A\cdot\sin\omega t = A\cdot\sin\frac{t}{\sqrt{LC}}$.

În general, funcţia sinusoidală $t \mapsto \sin\alpha t$ (cu α constant) este periodică, având perioada principală (≡cea mai mică perioadă strict pozitivă) $T = \frac{2\pi}{\alpha}$. Aşadar, circuitul oscilant al lui Hertz generează oscilaţii electrice cu perioada

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \qquad (17)$$

Aceasta este celebra **formulă Hertz–Thomson**, pe care am întâlnit-o şi în cazul circuitelor RLC la rezonanţă (formula (39) din Capitolul 3, §6.2). Frecvenţa oscilaţiilor $f = \frac{1}{T}$ este cu atât mai înaltă cu cât produsul LC este mai mic.

<u>Notă:</u> Formula (17) are loc în absenţa pierderilor de energie (cauzate, de exemplu, de existenţa unei rezistenţe R în circuit); în acest caz, oscilaţiile din circuit sunt amortizate, cu $T = 2\pi(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2})^{-1/2}$, iar curentul este $I(t) = A\cdot e^{-\frac{R}{2L}t}\cdot\sin\frac{t}{\sqrt{LC}}$.

Dacă la bornele circuitului se aplică o f.e.m. $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 \cdot \sin\omega_0 t$, ecuaţia (16) se complică puţin şi apar oscilaţii electrice forţate, ale căror amplitudini depind de raportul $\frac{\omega}{\omega_0}$, unde ω este frecvența naturală a circuitului, iar ω_0 este frecvența impusă din afară. Dar nu mai dăm detalii.

4.3. Câmpul electromagnetic, unde electromagnetice

Am văzut în Capitolul 3, §5.2 că sarcinile electrice mobile induc un câmp magnetic (legea Lorentz şi legea Biot–Savart–Laplace). De asemenea, un curent alternativ, spre deosebire de un curent constant, trece printr-un condensator şi creează un curent care nu este unul de conducţie şi este numit **curent de deplasare**; acesta creează un câmp electric variabil în timp, care la rândul lui induce un câmp magnetic variabil.

Liniile de câmp ale câmpului magnetic sunt curbe închise (numite vârtejuri), spre deosebire de liniile de câmp ale câmpului electrostatic. Am văzut că liniile de câmp magnetic create de un conductor rectiliniu parcurs de curent sunt cercuri concentrice situate în plane perpendiculare pe conductor, cu sensul dat de regula burghiului, (vezi și Cap.3, §5.1).

În cazul circuitului oscilant al lui Hertz, dacă se încarcă armăturile condensatorului cu sarcini electrice, acesta se descarcă prin bobină, producând un curent electric şi totodată un câmp magnetic. Variaţia în timp a câmpului magnetic induce un

câmp electric care reîncarcă armăturile condensatorului în sens invers şi acest proces periodic se reia indefinit.

Fie $\vec{E}$ vectorul câmpului electric dintre plăcile unui condensator (creat de curentul de deplasare); vectorul $\vec{j}(t) = \vec{E}'(t)$ se numeşte **densitatea curentului** de deplasare. În fiecare punct al spaţiului, este generat un câmp magnetic variabil $\vec{B}(t)$, cu vectorii câmpului vârtej situaţi în plane perpendiculare pe $\vec{E}$ (figura 5.14, a).

Dar în inducţia electromagnetică, un câmp electric cu linii de câmp închise (zis câmp electric vârtej) se manifestă ca o f.e.m. indusă. În fiecare punct din spaţiu, variaţia în timp a vectorului inducţie magnetică induce un câmp electric alternativ (figura 5.14,b); vectorii $\vec{E}(t)$ ai câmpului electric indus sunt situaţi în plane perpendiculare pe vectorii $\vec{B}(t)$.

Maxwell a transpus matematic această situaţie duală, sub forma unor ecuaţii cu derivate parţiale care îi poartă numele, folosind operatorul diferențial „rotor”, utilizat în teoria câmpului.

Fără a explica termenii, aceste ecuaţii se scriu:

$$\mathrm{rot}\,\vec{E} = -\vec{B}'(t)$$

$$\mathrm{rot}\,\vec{B} = \frac{1}{c^2}\vec{E}'(t)$$

unde c este viteza luminii în vid.

<u>Definiţie:</u> Fie D o anumită regiune în spaţiu. <u>A defini un câmp electromagnetic în D</u> înseamnă a asocia fiecărui punct

$M \in D$ şi fiecărui moment t, o pereche de vectori variabili $\vec{E}(M,t), \vec{B}(M,t)$ sau, pe scurt, $(\vec{E}, \vec{B})$, formată dintr-un câmp electric şi un câmp magnetic, perpendiculare unul pe altul în fiecare punct M, legate inseparabil între ele, oscilând şi generându-se reciproc.

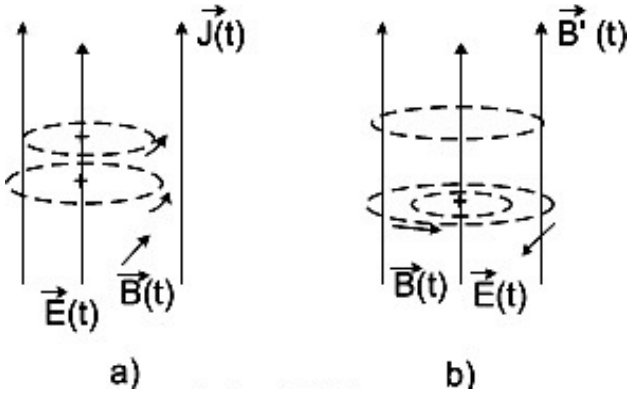


Fig. 5.14

Am văzut că orice circuit oscilant de tip Hertz creează un câmp electromagnetic, dar există multe alte generatoare. Liniile de câmp ale unui câmp electromagnetic sunt ca nişte împletituri de curbe γ_E, γ_B ca în figura 5.15 (precum inelele unui lanţ trecând prin fiecare punct din regiunea D).

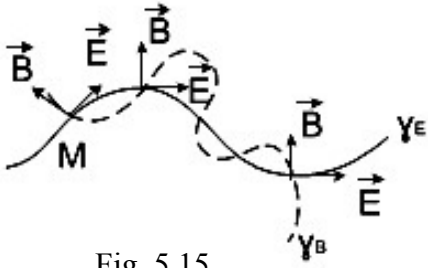


Fig. 5.15

Definiţie: **Undele electromagnetice** sunt un proces ondulatoriu de propagare a câmpului electric $\vec{E}$ şi magnetic $\vec{B}$; vectorul–viteză $\vec{v}$ al propagării este perpendicular pe planul vectorilor $\vec{E}$ şi $\vec{B}$ (figura 5.16).

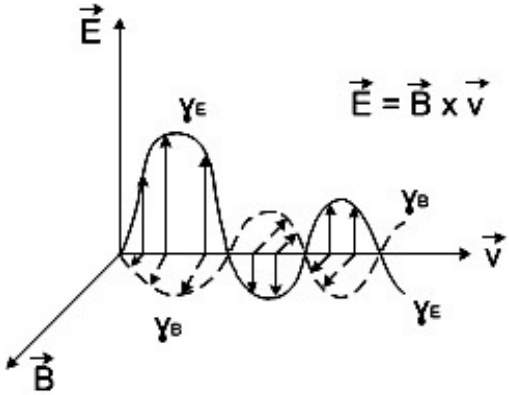


Fig. 5.16

Undele electromagnetice sunt unde transversale, purtătoare ale câmpului electromagnetic, adică oscilaţiile câmpurilor $\vec{E}$ şi $\vec{B}$ au loc pe direcţii perpendiculare pe direcţia deplasării. Spre deosebire de undele mecanice, ele nu se propagă printr-o mişcare de substanţă, ci a unui câmp, propagarea având loc cu viteze comparabile cu viteza luminii. Undele eletromagnetice se propagă în vid cu viteza luminii, în absenţa unui mediu material.

În cazul circuitului său oscilant, Hertz a măsurat, cu instrumentele modeste ale timpului (în 1880), lungimea de undă a undelor electromagnetice produse; anume, pentru curentul

$I(t) = A \cdot \sin \frac{t}{\sqrt{LC}}$, el a aplicat formula (8), de unde a dedus viteza de propagare $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{LC}}$ şi a obţinut un rezultat emoţionant! Viteza de propagare a undelor electromagnetice în vid este egală cu viteza luminii în vid: $v \cong c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$, aşa cum prezisese Maxwell cu 15 ani mai înainte.

Mai mult, Hertz a confirmat experimental şi alte proprietăţi ale undelor electromagnetice pe care Maxwell le formulase doar teoretic: propagarea rectilinie, reflexia şi refracţia. Ulterior, fizicienii au studiat dispersia, interferenţa, difracţia, polarizarea, radiaţia etc., deschizând era marilor aplicaţii ale Electromagnetismului şi apariţiei Electronicii – radioul, telefonia, televiziunea, holografia, tomografia, sistemele moderne de telecomunicaţii, celularele, Internetul etc., care au generat noi profesii şi au modificat viaţa pe întreaga planetă. În fiecare punct din spaţiu şi la fiecare moment suntem străbătuţi de diverse tipuri de unde electromagnetice, detectate sau nu, şi ale căror efecte sunt resimţite sau/şi folosite.

<u>Notă:</u> Reamintim că un dipol electric este o pereche de sarcini electrice *-q*, *q*, având aceeaşi mărime (în Coulombi); dacă distanţa dintre ele variază sinusoidal după legea $l(t) = l_0(t) \cdot \sin \omega t$, unde amplitudinea l_0 este strict mai mică decât lungimea de undă a unei unde electromagnetice, atunci dipolul emite o putere $P = 1{,}11 \times 10^{-16} \cdot q^2 \cdot \omega^4 \cdot l_0^2 (\text{Watt})$.

Conductorii în lungul cărora circulă curent electric alternativ şi care emit unde electromagnetice se numesc **antene**.

4.4. Spectrul electromagnetic

În tabelul următor, redăm o clasificare pe mai multe linii şi coloane: lungimea de undă λ în cm, frecvenţa $f = \frac{3 \times 10^{10}}{\lambda}$ în Hz, denumirea domeniilor de manifestare şi comentarii privind generarea şi utilizarea tuturor tipurilor de unde electromagnetice.

Clasificarea undelor electromagnetice se poate face după mod de emisie (unde hertziene, generate în circuite oscilante, radiaţie termică etc.) sau după frecvenţă: **unde radio** (cu frecvenţa de 20 Hz... 1 GHz; lungi cu $\lambda \cong$ 1km, medii $\lambda \cong$ $\cong$400m, scurte $\lambda \cong$ 50m şi ultrascurte $\lambda \cong$ 5cm), **microunde** (de la 1 GHz la $3x10^{11}$ Hz; $\lambda \cong$ 30 cm - 1 mm), **radiaţia infraroşie** ($3x10^{11}$ Hz - $4x10^{14}$ Hz cu $\lambda \cong 10^{-3}$ - şi $8x10^{-7}$ m; rezultate la încălzirea corpurilor), **lumina vizibilă** ($8x10^{-7}$ m - $4x10^{-7}$ m), **radiaţie ultravioletă** (10^{15} Hz - 10^{16} Hz), **raze X** de 10^{20} Hz şi **raze gamma**.

Razele infraroşii sunt emise prin oscilaţiile unor grupuri de atomi. Razele de lumină vizibilă sunt emise de atomi şi molecule în urma unor modificări ale stărilor electronilor pe orbitele lor extreme. Razele X (≡Roentgen) sunt emise ca rezultat al modificărilor stărilor electronilor pe orbitele interne sau al unor decelerări rapide ale unor particule încărcate. În fine,

razele gamma sunt emise de nuclee excitate ale unor atomi sau de particule încărcate, în urma unor ciocniri.

λ (cm)	f (Hz)	Domeniul	Utilizări
10^{13}	$3x10^{-3}$	Unde de joasă frecvență	Unde generate prin oscilatori speciali
10^{13} 10^{10}	$3x10^{-3}$ 30		Generatori de curent alternativ (alternatori), aplicaţi la motoare în curent alternativ de 50... 60 Hz
10^{8}	300		Unde sonore, generate prin oscilatori de frecvenţă audio, utilizate de microfoane, megafoane
10^{5}	$3x10^{5}$	Unde radio	Unde generate de diverşi oscilatori electrici, utilizate în transmisie radio, telegrafie,televiziune, radar
10^{2} 1	$3x10^{8}$ $3x10^{10}$		Unde metrice, centimetrice, milimetrice, utilizate în studiul interacţiei radiaţiei cu substanţa, spectroscopie cu microunde, radioastronomie
10^{-1} 10^{-3}	$3x10^{11}$ $3x10^{13}$	Raze de lumină infra-roşie, razele micronice	Radiaţia termică, descărcări în gaze, fotografie în întuneric
10^{-4} 10^{-8}	$3x10^{14}$ $3x10^{18}$	Lumina ultraviolet, raze X	Radiaţia solară, microscopie ultraviolet, medicină, detecţie. Lumina vizibilă are frecvenţe între 4 şi $7,5x10^{14}$ Hz
10^{-9} 10^{-11}	$3x10^{19}$ $3x10^{21}$	Raze gamma	Dezintegrare radioactivă a nucleelor, acceleratoare de particule

Am indicat în tabelul anterior diverse surse ale undelor electromagnetice – interacţiile dintre substanţă şi radiaţie în

diverse situaţii, dispozitive electronice, reacţii atomice, Soarele, pulsarii etc. Un subiect de mare actualitate, interdisciplinar prin excelenţă, este legat de securitatea organismelor biologice la radiaţiile electromagnetice.

4.5. Lumina ca radiaţie electromagnetică, polarizarea luminii

Lumina vizibilă este direct legată de dezvoltarea simţurilor vederii la oameni, animale, păsări, insecte etc. Ca undă electromagnetică, ea are lungimi de undă între 400 nm= $4x10^{-7}$m şi 760 nm=$7,6x10^{-7}$ m şi frecvenţa între 4 şi respectiv $7,5x10^{14}$ Hz, între infraroşu (cea mai lungă) şi ultraviolet (cea mai scurtă). Viteza ei, *c,* în vid este o constantă fundamentală a fizicii; în alte medii, viteza luminii este diferită (de exemplu, în apă este de circa 3/4 *c*).

Există animale sensibile la radiaţia infraroşie (de exemplu, şerpii); razele ultraviolete sunt invizibile pentru oameni, (fiind absorbite de cornee), dar sunt detectate de insecte.

Există mai multe surse de lumină – cele termice, lumina Soarelui (care are o temperatură medie de 6000 K), becurile incandescente (care emit 10% lumină vizibilă, restul fiind radiaţie infraroşie). De asemenea, licuricii produc lumină.

Lumina vizibilă este emisă şi absorbită în „mici pachete” de fotoni, cu proprietăţi deopotrivă ondulatorii şi corpusculare. În ultimul timp, teoria cuantică a explicat liniile spectrale şi efectul fotoelectric, fenomen asupra căruia vom reveni. Există

multe alte fenomene legate de lumină – fosforescenţa, luminiscenţa sau presiunea luminii asupra obiectelor.

În continuare, ne vom referi pe scurt la fenomenul de polarizare a luminii.

În undele luminoase emise de diverse surse, vectorii de câmp $\vec{E}$, $\vec{B}$ sunt orientaţi cu restricţia de a fi perpendiculari unul pe altul şi cu planul lor perpendicular pe direcţia de propagare a luminii (căci $\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v}$). Se spune atunci că lumina este <u>naturală</u>. Din lumina naturală se pot separa unde în care $\vec{E}$ oscilează în acelaşi plan pe întregul drum al undei, fapt care se poate realiza trecând lumina printr-un polaroid (de exemplu, o placă de silicat–turmalină). Aceste unde, separate din lumina naturală, se zic **polarizate liniar.** Planul care conţine vectorii $\vec{B}$ într-o undă polarizată liniar se numeşte **plan de polarizare**, iar planul care conţine vectorii $\vec{E}$, **plan de vibrare**.

Polarizarea unei unde (inclusiv lumina) revine la aceea că vibraţiile undei au loc cu precădere în anumite plane sau pe anumite direcţii. O polarizare liniară arată ca în figura 5.17.

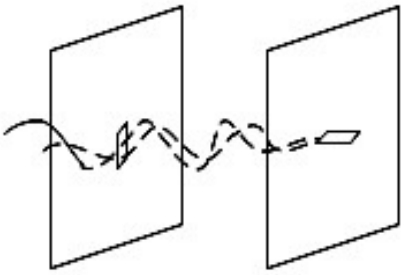


Fig. 5.17

Lumina solară naturală nu este polarizată şi vibraţiile au loc pe toate direcţiile, distribuite uniform în jurul axei de propagare. Polarizarea luminii se realizează cu dispozitive specializate.

Exemplu: Lumina naturală reflectată de suprafaţa unui dielectric devine parţial polarizată şi va fi complet polarizată la un unghi egal cu arctg n, numit unghi Brewster, unde n este indicele de refracţie al dielectricului.

Atunci când o rază de lumină naturală trece prin anumite cristale de cuarţ, două raze ies cu viteze diferite şi polarizate în plane perpendiculare, fenomen numit **birefringenţă**.

4.6. Radiaţia termică

Corpurile încălzite emit unde invizibile, de tipul undelor ultraviolete cu lungimi de undă λ sub 4000 Å (Angstromi)= $4x10^{-7}$ m şi al undelor infraroşii cu λ de peste 7000Å=$7x10^{-7}$ m.

Radiaţia electromagnetică generată de mişcarea atomilor sau moleculelor se numeşte **radiaţie termică**.

Un corp care absoarbe complet întreaga radiaţie incidentă primită este numit **corp negru**.

Notă: În Capitolul 2 am studiat legile de propagare a căldurii între corpuri, care permit determinarea cantităţii de căldură transferată în diverse situaţii şi a temperaturilor finale ale corpurilor considerate. Transferul termic poate fi realizat prin **conducţie** (prin contact direct între particulele corpurilor solide aflat la diverse temperaturi), prin **convecţie** (într-un gaz sau

lichid), prin deplasări ale straturilor de la o regiune la alta şi prin **radiaţie**. Transferul termic prin radiaţie este realizat prin undele electromagnetice, incluzând o dublă transformare: un corp fierbinte radiază/generează oscilaţii electromagnetice şi cel mai rece absoarbe această energie şi se încălzeşte.

Fluxul radiativ Φ al unui corp este energia termică Q emisă în mediu în unitatea de timp, $\Phi = \frac{Q}{t}$, măsurat în Watt. Dacă un flux radiativ Φ cade pe suprafaţa unui corp, o parte Φ_A este absorbită de corp, o parte Φ_R este reflectată şi cealaltă Φ_D trece prin corp; raportul $A = \frac{\Phi_A}{\Phi}$ se numeşte capacitatea de absorbţie; $R = \frac{\Phi_R}{\Phi}$ este reflectivitatea şi $D = \frac{\Phi_D}{\Phi}$ transmisivitatea. Desigur, $A+R+D=1$.

Pentru corpul negru ideal, $A=1$, R=0, D=0; pentru funingine de petrol, $A \cong 0{,}96$ şi, de necrezut, zăpada şi gheaţa sunt corpuri aproape negre cu A peste 0,94 (ceea ce se explică prin absorbţia înaltă a razelor ultraviolete şi infraroşii). Dacă $R=1$, $A=0$, $D=0$, corpul este absolut reflectant (pentru aluminiu şi argint, $R \cong 0{,}9$ şi la fier, $R \cong 0{,}4$); dacă $D=1$, $A=0$, $R=0$, atunci corpul este absolut transparent la radiaţie.

<u>Exemple:</u> Gazele mono şi diatomice (hidrogen, oxigen, azot, heliu) sunt absolut transparente, dar CO_2 nu! Celebrul „efect de seră” capătă astfel o explicaţie.

Notă: Kirchhoff a arătat că la echilibru termodinamic, raportul Φ_0 dintre emisivitatea unui corp (flux radiativ raportat la lungimea de undă, pentru o temperatură dată) şi capacitatea lui de absorbţie nu depinde de acel corp, ci numai de temperatura sa absolută. Mai târziu, fizicienii germani J.Stefan şi L.Boltzmann au arătat că

$$\Phi_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \cong 5{,}7 \cdot (\frac{T}{100})^4 \qquad (18)$$

unde $\sigma_0 \cong 5{,}7 \times 10^{-8}\,\mathrm{W/m^2K^2}$ (**constanta radiativă a corpului negru**).

4.7. Câteva aplicaţii

Există multe aparate, dispozitive şi tehnologii minunate – radio, televizor, casetofon, celular, tabletă, tomografie, holografie, RMN, radar, reţea Internet, radioastronomie etc.

Nu le putem înţelege funcţionarea decât apelând la … Fizică. Dezvoltările tehnologice îşi au şi ele un loc decisiv.

Fără a intra în detalii, prezentăm ideile câtorva din aceste invenţii excepţionale, fie şi pentru a nu ne pierde capacitatea de a ne mira sau bucura.

a) Radioul

Acesta ne permite să receptăm sunete (vocale, muzicale) trimise cu viteza luminii prin aer, fără a utiliza fire conductoare („wireless”) de la o staţie de emisie. Sunetele sunt emise în faţa unui microfon şi vibraţiile elastice ale undelor sonore fac ca straturile de aer să apese pe o membrană; un strat de cărbune

provoacă variaţia intensităţii semnalului electric slab şi apoi amplificat (figura 5.18, a).

Un circuit oscilant de tip Hertz generează o undă electromagnetică sinusoidală purtătoare, la frecvenţe radio de ordinul MHz (figura 5.18, b), iar semnalul electric a) este suprapus şi se mulează peste această undă fiind ”înglobat” în unde purtătoare, într-un modulator de amplitudine; unda este alterată („modulată”) pentru a urmări modificările de amplitudine/putere ale semnalului audio original (figura 5.18,c).

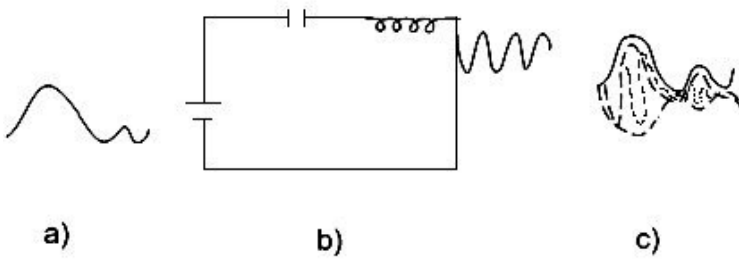


Fig. 5.18

Se spune că tehnologia este de tip AM („modulaţie în amplitudine”), spre deosebire de tipul FM („modulaţie în frecvenţă”). Semnalul electric ajunge la antena de emisie şi unda electromagnetică radio este propagată în toate direcţiile. O altă antenă, aflată la aparatul de radio, recepţionează unda radio (prin ”acordare”), amplifică semnalul, îl demodulează şi îl filtrează; acordarea pe frecvenţa dorită se face tot printr-un circuit oscilant cu condensator de capacitate variabilă, iar modularea înseamnă separarea undei purtătoare de semnalul util (sau scoaterea semnalului util din unda transmisă).

În final, semnalul audio generează vibraţii ale diafragmei difuzorului aparatului radio, care înlesnesc redarea sunetului original. Tehnologia FM are avantajul că elimină diverse distorsiuni/paraziţi, dar are o arie de acoperire mai restrânsă.

Frecvenţele AM sunt în zona 550...1600 kHz şi cele FM între 88 şi 108 MHz.

Detalierea etapelor menţionate ar umple multe zeci de pagini.

b) Televizorul

Cel mai mic element al unei imagini statice este pixelul („picture element”), care poate fi asimilat cu un pătrăţel de mici dimensiuni (de circa 10×10 μm^2); monitoarele uzuale au o rezoluţie de 800×600 pixeli, iar imaginile foto performante au între 600 şi 1000 ppi („pixeli/inch”). Imaginile TV sau video ni se par continue, deşi sunt discrete, formate dintr-un număr mare de pixeli, ca o matrice dreptunghiulară de date reprezentate de biţi, nivele de gri sau nuanţe de culori.

S-a constatat că ochiul uman percepe ca fiind imagini dinamice (video, animaţie sau foto în direct) acele imagini care de fapt sunt statice, dar care sunt derulate cu o viteză de 24 cadre/secundă. Televizorul are principial multe puncte comune cu radioul, dar şi multe particularităţi.

Acţiunile filmate sunt preluate de camerele de luat vederi, apoi transformate în semnale electrice şi modulate pe anumite frecvenţe, cu ajutorul unor antene. Semnalele ajung la televizorul receptorului, acordate pe frecvenţa acestuia, apoi demodulate, cu reconstituirea imaginii şi sunetului originale. O

piesă de bază a televizorului este tubul catodic, laolaltă cu tubul analizor de imagini. Pentru televizoarele color sunt necesare trei astfel de tuburi, conform celor trei culori de bază – roşu (R), verde (G) şi albastru (B). Lungimile lor de undă sunt λ_R =700nm; λ_G=546,1nm; λ_B=435,8nm. Pentru orice altă culoare, să zicem F, Grassmann a arătat că există şi sunt unice numere reale *a*, *b*, *c* astfel încât $\lambda_F = a\lambda_R + b\lambda_G + c\lambda_B$; de exemplu, lumina albă este R+4,6G+0,6B. Transmisiile TV în culori se referă la culorile de bază, cu calibrările corespunzătoare.

Pentru o transmisie sigură de informaţie, lungimea de undă a semnalului trebuie să fie mai mare decât cea a sinusoidei purtătoare. De exemplu, pentru a transmite muzică, sunt suficiente unde electromagnetice cu frecvenţe din gamele de unde lungi, medii şi scurte, dar pentru transmisii TV, sunt necesare frecvenţe din gama de unde ultrascurte.

Telefoanele mobile (≡celulare) emit şi recepţionează semnale sonore prin legături radio, acoperind o arie vastă de comunicare, asigurând servicii de e–mail, Internet etc. Ele au o antenă pentru transmiterea semnalelor şi un receptor care lucrează separat pe frecvenţe diferite şi pot fi acordate pe un domeniu larg de frecvenţe.

c) Digitalizare

Dacă pentru transmisiile de informaţie s-ar folosi lumina, la care frecvenţele oscilaţiilor sunt de GHz, s-ar putea mări viteza de transmisie cu multe ordine de mărime.

Avem $f = \frac{c}{\lambda}$ și pentru lumina vizibilă λ este între 400 și 700 nm, deci f este aproximativ $5x10^{14}$ Hz. Această idee a devenit realizabilă, dar nu încă realizată, prin laseri (surse de lumină monocromatică, ce permit transmisii cu pierderi mici).

După înzestrarea cu codificare şi decodificare a semnalelor, vremea conductorilor de cupru a fost depăşită şi am intrat în era reţelelor de comunicare de mare viteză şi fiabilitate, legate de procesul de **digitalizare** (sau **numerizare**), adică transmisie de date ca succesiuni de „1” şi „0”.

Începutul digitalizării a fost următorul. În codul ASCII, sunt fixate $256=2^8$ simboluri utilizate (şi suficiente!) în diversele descrieri matematice sau extramatematice – litere, cifre, etichete de operaţii, funcţii elementare, semne matematice speciale etc.

Fiecare din cele 256 de simboluri are o reprezentare ca octet. De exemplu, $A \equiv 01000001$, $B \equiv 01100010$ etc. Ca atare, orice text ştiinţific se poate codifica prin octeţi (nu urmărim acum optimizări). Mergând mai departe, fiecare octet poate fi identificat cu câte un semnal discret, ca în figura 5.19, sau ca un semnal continuu; de exemplu,

$f(t) = e^{-20(t-\frac{1}{8})^2} + e^{-20(t-\frac{7}{8})^2}$ pentru litera A şi

$g(t) = e^{-20(t-\frac{1}{8})^2} + e^{-20(t-\frac{2}{8})^2} + e^{-20(t-\frac{6}{8})^2}$ pentru litera B.

Graficele funcţiilor f şi g sunt imposibil de redat, dar folosind un modem convenabil („modulator/demodulator”), semnalele f şi g reprezintă cvasiperfect simbolurile A şi B.

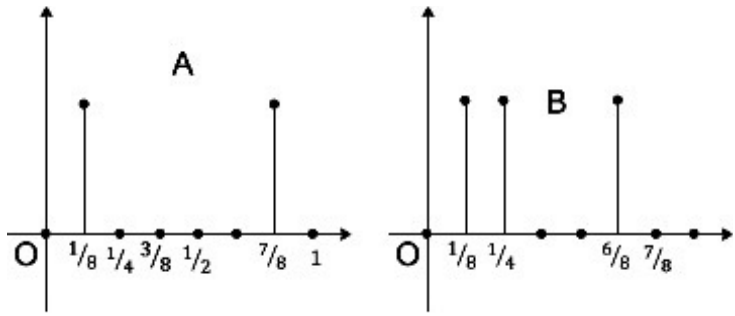


Fig. 5.19

Ulterior s-au pus la punct tehnologii de digitalizare a transmisiilor radio şi televiziune (şi nu numai), unde semnalele audio/video sunt reprezentate prin „0” şi „1”, supuse unor compresii care utilizează formate de tip mp2 (standardizare audio–video digital) şi procesări digitale de modulare/ demodulare sau filtrare/separare de zgomot. Există actualmente mai multe sisteme de transmisii radio digitale recunoscute, dar tehnologiile analogice AM şi FM sunt încă populare; receptoarele radio şi TV prin protocoale IP sunt în mare avânt, legate de utilizarea sateliţilor de telecomunicaţii şi de economia realizată prin reducerea benzilor de frecvenţă şi calitatea mult îmbunătăţită a imaginilor şi sunetelor transmise. Domeniile militar, financiar, medical, comunicaţional etc. sunt direct interesate de noile tehnologii informatice.

d) Tomografia („tomos”≡secţiune, în greceşte)

Tomografia este un ansamblu de tehnici de organizare, tratare şi control nedistructiv al corpului uman sau al diverselor materiale, realizând diverse secţiuni ale obiectelor studiate;

secţiunile sunt realizate cu raze X, raze gamma, flux de neutroni etc. Aparatele care aplică tehnicile respective sunt numite **tomografe** şi sunt utilizate în medicina radiologică preventivă, în Biologie, Ştiinţa materialelor şi în studiul interacţiei substanţă – radiaţie. Tomografele decelează diverse tumori, chisturi sau fisuri, care pot fi apoi neutralizate fără intervenţie chirurgicală sau destructivă.

Fundamentul ştiinţific al tomografiei se află într-o lucrare din 1917 a matematicianului austriac I. Radon (profesor şi la Universitatea din Cernăuţi) şi în legea Lambert a radiaţiei, pe care medicul sudafrican A.Cormack şi fizicianul englez G.Hounsfield le-au pus în valoare în 1960, construind totodată primul scanner tomograf, pentru care au primit premiul Nobel.

Dacă un fascicul de raze traversează un strat subţire al unei plăci dintr-un material de grosime Δx, atunci variaţia ΔI a intensităţii I a radiaţiei este proporţională cu grosimea, adică $\Delta I=-bI\Delta x$ (unde $b>0$ este coeficientul de absorbţie al stratului).

Aşadar, $I'(x)=-bI(x)$, de unde $\frac{I'(x)}{I(x)}=-b$, deci $\ln I(x)=-b\cdot x+\ln C$, adică $I(x)=Ce^{-bx}$; făcând $x=0$, rezultă $C=I(0)$. Se obţine astfel relaţia:

$$I(x)=I(0)\cdot e^{-bx} \text{ (Legea lui Lambert).} \qquad (19)$$

Dacă P este o placă subţire cu pereţi paraleli şi dacă introducem coordonate ca în figura 5.20, atunci notând cu $f(x,y)$ coeficientul de absorbţie/atenuare în punctul (x,y), atunci în lungul unei raze curente Δ, aplicând (19) rezultă relaţia

$I_B = I_A \cdot e^{-J}$, unde I_B (respectiv I_A) reprezintă intensitatea radiaţiei la ieşirea B (respectiv la intrarea A), iar $J = \int_{AB} f(x,y)\,ds$ este însumarea atenuărilor în lungul segmentului de dreaptă Δ situat în interiorul plăcii.

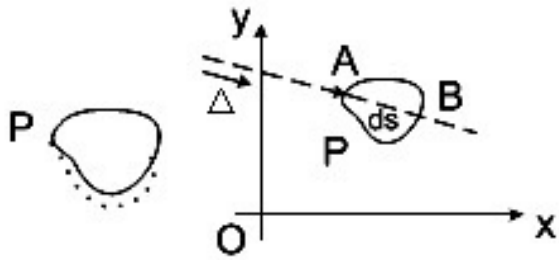


Fig. 5.20

Aşadar, $e^J = \dfrac{I_A}{I_B}$, deci $J = \ln\dfrac{I_A}{I_B}$ şi se obţine ecuaţia

$$\int_{AB} f(x,y)\,ds = \ln\frac{I_A}{I_B} \qquad (20)$$

cu necunoscuta $f(x,y)$. Aceasta este o ecuaţie integrală de tip Radon. Cunoscând funcţia f, chiar şi numeric, în punctele unei reţele 2D din planul xOy, se obţin informaţii asupra disturbanţelor atenuărilor existente (datorate, de exemplu, unor tumori sau fisuri), în interiorul plăcii P, pe diverse direcţii Δ.

Ecuaţia (20) este un exemplu de relaţie între date accesibile măsurătorilor (aşa cum sunt I_A, I_B, Δ) şi date inaccesibile (precum $f(x,y)$). Ecuaţia (20) este rezolvată prin procedee SOFT computaţionale specializate, materializate în tomografie. Marele beneficiar al tomografiei îl reprezintă

Medicina. Până recent, dacă îl durea ceva în interior sau avea ameţeli etc., pacientul mergea la chirurg pentru o intervenţie agresivă şi riscantă. Acum, folosind termeni prozaici, este culcat într-o incintă care cuprinde o sursă de raze X (de exemplu), rotită şi deplasată în jurul pacientului (figura 5.21); intensitatea radiaţiei este măsurată cu precizie şi folosind cele spuse anterior (ascunse nespecialiştilor), se va determina prezenţa defectelor eventuale după gradul de disturbare a efectelor radiaţiei la contactul cu ţesuturile corpului tomografiat.

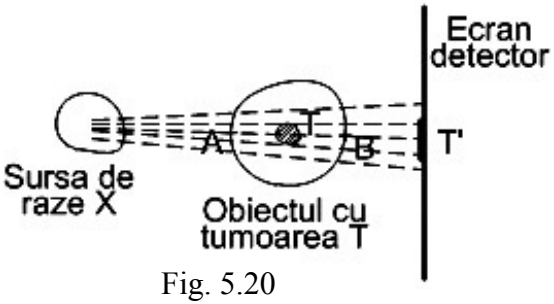


Fig. 5.20

Am prezentat această nouă tehnologie ca o ilustrare a stadiului unde a ajuns cercetarea ştiinţifică multidisciplinară, în care lucrează, simultan sau nu, electronişti, fizicieni, medici, matematicieni, informaticieni etc. Numărul aplicaţiilor care se bazează pe achiziţiile din studiul fenomenelor electrice şi magnetice este mult mai mare. Fără a intra în detalii, este suficient să listăm câteva mai semnificative: holografie, fotometrie, radar, radioastronomie, monitorizare a străzilor, clădirilor şi interioarelor, analiză RMN, cuptor cu microunde, detector de mine personal, imagologie, recunoaşterea formelor etc.

PARTEA A II–A

COMPLETĂRI, ÎNTREBĂRI ŞI RĂSPUNSURI

CAPITOLUL 3′ - FENOMENE ELECTRICE ŞI MAGNETICE

- Ce se întâmplă cu forţa coulombiană între două sarcini care se dublează şi ambele îşi schimbă semnul?

(R) Forţa de interacţie (≡interacţiune) îşi păstrează caracterul de atracţie sau respingere, dar mărimea ei creşte de 4 ori.

- Cunoaşteţi generatori de sarcini electrice pozitive sau negative?

(R) Mătasea frecată pe sticlă generează sarcini „+”, iar blana frecată de ebonită generează sarcini „−”. Electronii sunt purtători de sarcini negative −.

- Ştiţi valoarea sarcinii electronului? Dar a protonului? De ce orice atom este neutru electric?

(R) $e = -1{,}6 \times 10^{-19}$ [C] şi protonul are sarcina $-e = +1{,}6 \times 10^{-19}$ [Coulombi]. Atomul este neutru electric, deoarece numărul electronilor săi este egal cu cel al protonilor.

- Sarcinile electrice sunt create sau dispar?

(R) Nu. Ele circulă de la un corp la altul sau în interiorul unor corpuri, al unor molecule sau atomi. Există „legea conservării sarcinilor electrice”.

Cum sunt purtate sarcinile electrice?

(R) Prin **electroni** detaşaţi din atomii lor ca în cazul metalelor, prin **ioni** (care sunt părţi din molecule sau atomi, încărcate electric) ca în cazul electroliţilor sau gazelor; dar şi prin particule coloidale încărcate, în lichide.

Există o deosebire între câmp electrostatic şi câmp electric?

(R) Câmpurile electrostatice sunt cele asociate unui număr **finit**, oricât de mare, de sarcini electrice fixe. Câmpurile electrice într-o regiune a spațiului sunt legate de corpuri încărcate electric şi de acţiunea unor forţe asupra sarcinilor electrice.

Cum se definesc în vid câmpul electrostatic, potenţialul său scalar într-un punct M şi intensitatea câmpului la distanţa r?

(R) Fie q o sarcină electrică fixată. Pentru orice punct M, notăm $\vec{r} = \overrightarrow{qM}$; atunci $\overrightarrow{E_q}(M) = \varepsilon \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$. Potenţialul scalar este $V_M = -\varepsilon \frac{q}{r}$. Intensitatea este $\left|\overrightarrow{E_q}(r)\right| = \frac{\varepsilon q}{r^2}$.

Forța coulombiană de acţiune asupra unei sarcini q', aflată la distanţa r de q, este $\overrightarrow{E_q}(r) \cdot q'$.

Puteţi enunţa legea lui Coulomb?

(R) Un răspuns incomplet este următorul: „Forţa de interacţie a două sarcini este proporţională cu produsul sarcinilor şi invers proporţională cu pătratul distanţei dintre ele”. Precizăm că este vorba de forţa cu care sarcina q_1 acţionează asupra lui q_2 (şi nu invers). Fie $\vec{r} = \overrightarrow{q_1 q_2}$. Atunci $\vec{F} = \varepsilon \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^3} \cdot \vec{r}$ depinde de

alegerea sistemului de unităţi de măsură, iar ε este permitivitatea relativă a mediului.

În sistemul SI, $\varepsilon = 9 \cdot 10^9 N \cdot m^2 / C^2$. Legea lui Coulomb are loc atât în lumea micro, cât şi în cea macroscopică.

Ce este curentul electric? Ce tipuri de curent electric există?

(R) Mişcarea ordonată de sarcini electrice, printr-un conductor (metalic – sârmă; cablu). Curentul poate fi **continuu** dacă nu-şi schimbă sensul (constant, adică prin secţiunea conductorului trec în acelaşi interval de timp, acelaşi număr de sarcini); sau alternativ, dacă sensul este schimbat periodic.

Ce este intensitatea unui curent electric?

(R) $I = \dfrac{Q}{\Delta t}$ (cantitatea de electricitate ≡ sarcina totală care trece printr-o secțiune transversală a unui conductor într-un interval de timp Δt, împarțit la Δt). 1 A este intensitatea curentului care poartă 1C în 1s. În general, $I(t) = Q'(t)$.

Cantitatea de electricitate este $Q = N \cdot e$, unde N este numărul electronilor purtători şi e=sarcina electronului (sau adaptat în cazul ionilor sau altor purtători). În limbaj uzual, intensitatea se numeşte simplu curent.

Dar tensiunea unui curent electric?

(R) În cazul curentului electric care circulă printr-un conductor metalic, tensiunea este diferenţa potenţialelor electrice între capetele conductorului (A, B). Dacă $V_A > V_B$, curentul convențional (mișcare orientată de sarcini pozitive) circulă de la

A la B deci de la potenţialul mai mare spre cel mai mic; tensiunea este $U = V_A - V_B$, măsurată în volţi. Ea se măsoară prin voltmetre, legate în paralel cu dipolul respectiv.

Cum formulaţi legea lui Ohm?

(R) În cazul unei reţele electrice închise sau al unui dipol fără generator, curentul I este direct proporţional cu tensiunea la borne: $I = \frac{1}{R}U$ deci $U = R \cdot I$, unde R este rezistenţa (dependentă de conductor). Legea lui Ohm are o formulare mai complexă pentru segmente de reţea electrică ce conţin generatoare.

Cum se construiesc rezistenţe electrice convenabile?

(R) Se aplică formula $R = \rho \cdot \frac{l}{s}$, unde ρ este rezistivitatea sârmei din care se confecţionează rezistenţa (ρ este dată în tabele), l=lungimea conductorului şi s=aria secţiunii transversale a sârmei.

Ce generatoare (surse de curent) cunoaşteţi? Pentru circuitul închis, cum se determină intensitatea curentului prin circuit?

(R) Bateriile, acumulatoarele sunt surse de curent continuu, constant. Generatorul asigură forţa electromotoare **E** (măsurată în volţi); el are o rezistenţă internă.

Notând cu U (fig. 3′.1) tensiunea la borne, cu u tensiunea internă şi cu I intensitatea, avem $\mathbf{E} = U + u$ şi conform legii lui Ohm, $U = R \cdot I$ şi $u = r \cdot I \Rightarrow \mathbf{E} = I(R + r)$ şi $I = \frac{\mathbf{E}}{R + r}$.

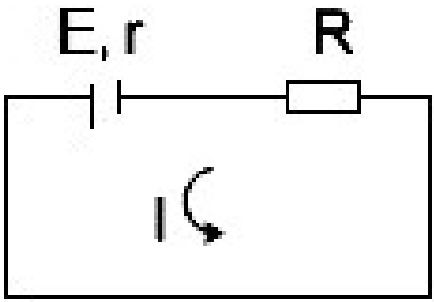


Fig. 3'.1

Ce înseamnă funcţionare în gol? Dar scurtcircuit?

(R) Dacă $R \neq 0$ în cazul anterior, se spune că circuitul funcţionează în sarcină. Dacă R=0, avem **scurtcircuit**; în acest caz, U=0 şi intensitatea la scurtcircuit este $I_{SC} = \frac{\mathbf{E}}{r}$. Dacă $R \to \infty$, adică circuitul exterior este întrerupt, atunci tensiunea la borne $U = R \cdot I = \frac{\mathrm{R}\,\mathbf{E}}{R + r}$ tinde să fie egală cu **E**; atunci se spune că avem o funcţionare în gol.

Ce este un condensator electric şi ce rol are el?

(R) Un **condensator** plan (≡**capacitor**) este un sistem format din două plăci metalice plane paralele (numite **armături**) despărţite de un mediu izolator. Condensatorul stochează pe cele două plăci sarcini electrice $+q$ şi $-q$ şi există o diferenţă de potenţial U între armături. **Capacitatea** unui condensator (notat simbolic „⊣⊢") este numărul pozitiv $C = \frac{q}{U}$ (cu unitatea de măsură – **faradul**). Condensatoarele permit stocarea de sarcini electrice, utilizabile ulterior.

Ştiţi formula de calcul al capacităţii unui condensator plan?

(R) $C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d}$, unde S=aria uneia din armături, d=distanţa dintre armături şi ε o constantă de mediu, o caracteristică a mediului dintre armături. Aceasta este dată în tabele specializate şi este numită permitivitatea sau **constanta dielectrică** a mediului.

- Cunoaşteţi cum se calculează capacitatea unui condensator obţinut prin legarea în paralel (respectiv în serie) a unor condensatori daţi; puteţi argumenta acele formule?

(R) Cu notaţii transparente, la legarea în paralel avem $C = C_1 + C_2 + ...$ şi la legarea în serie, $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ...$

Reamintim că $q = C \cdot U$, deci $C = \frac{q}{U}$ (unde se presupune q>0). La legarea în paralel a condensatorilor, tensiunea dintre plăcile lor este aceeaşi şi sarcina totală este suma sarcinilor de la fiecare condensator $\Rightarrow q = q_1 + q_2 + ...$ deci $C \cdot U = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U + ...$ şi $C = C_1 + C_2 + ...$ La legarea în paralel, condensatorilor li se leagă plăcile de acelaşi tip şi sarcina pozitivă a legării este suma sarcinilor pozitive ale componentelor.

La legarea în serie, pe toţi condensatorii se stabileşte o aceeaşi sarcină în modul (căci suma sarcinilor tuturor plăcilor lipite una de alta este nulă). Potenţialul acestor plăci este acelaşi. Plăcile 2, 3 au sarcini diferite dar egale în modul (fig. 3′.2).

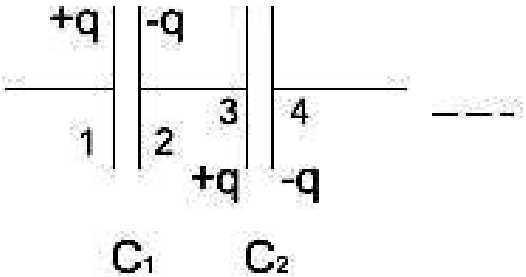


Fig. 3'.2

Aşadar

$$U = U_1 + U_2 + ... \Rightarrow \frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + ... \text{ şi } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ...$$

- Fiind dată o sursă de curent cu t.e.m. **E,** cu rezistenţa internă *r*, închisă cu o rezistenţă exterioară *R*, care este randamentul η al sursei?

(R) $\eta = \frac{P_u}{P_{tot}}$, unde P_u=puterea utilă, degajată pe rezistenţa exterioară şi P_{tot}=suma puterilor degajate pe rezistenţele internă şi externă; deci $\eta = \frac{I^2 \cdot R}{I^2(R+r)} = \frac{R}{R+r}$.

- Fie o sursă cu t.e.m. **E**, cu rezistenţa internă a sursei *r* constantă. Cum variază randamentul η al sursei ca funcţie de *R*?

(R) Pentru *R*=0 (închidere scurtă), avem η=0 şi pentru *R*=*r*, avem η=0,5; pentru $R \to \infty$, $\eta = \frac{R}{R+r}$ tinde către 1. (fig. 3′.3)

- Presupunând din nou că t.e.m. **E** şi rezistenţa *r* internă a sursei sunt constante, cum variază puterea utilă ca funcţie de rezistenţa externă?

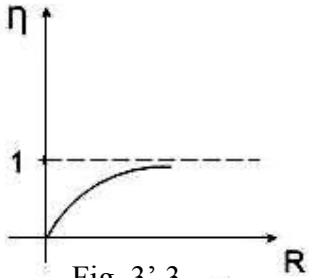


Fig. 3'.3

(R) În acest caz, $P_u = I^2 \cdot R$.

Dar $I = \dfrac{\mathbf{E}}{R+r}$ deci $P_u = \mathbf{E}^2 \cdot \dfrac{R}{(R+r)^2}$. Graficul funcţiei $R \to P_u$ este de forma indicată în figura 3′.4 (aplicând puţină matematică).

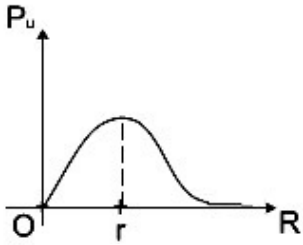


Fig. 3'.4

- Ştiţi cum se introduc ampermetrul şi voltmetrul într-un montaj electric?

(R) Ampermetrul se conectează în serie; voltmetrul, în paralel cu elementul a cărui tensiune se măsoară.

Ele devin elemente ale montajului. $I_S = \frac{1}{R_S} \cdot U_{MN}$ fig. 3′.5.

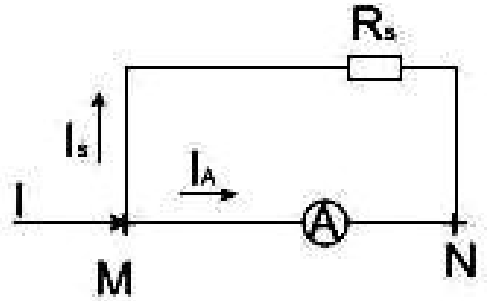


Fig. 3'.5

Ştiţi ce este şuntul ampermetrului?

(R) Un ampermetru are rezistenţa proprie R_A şi poate măsura curenţi cu intensitatea maximă I_A. Pentru a mări intervalul (≡plaja) de măsurare de *n* ori şi a măsura astfel curenţi până la valoarea $I = n \cdot I_A$, se conectează în paralel cu ampermetrul o rezistenţă $R_s = \frac{1}{n-1} \cdot R_A$ (numită **şunt**); fig. 3′.5.

(Demonstraţie. $I = I_A + I_S$, $nI_A = I_A + I_S$ deci $(n-1)I_A = I_S$.

Dar $I_A = \frac{1}{R_A} U_{MN}$ şi $I_S = \frac{1}{R_S} \cdot U_{MN}$ deci $R_s = \frac{1}{n-1} \cdot R_A$).

Ştiţi ce este o rezistenţă adiţională?

(R) Un voltmetru cu rezistenţa proprie R_V poate măsura cel mult o tensiune U_V. Pentru a mări de *n* ori plaja pentru tensiunea *U* de măsurat, se conectează în serie cu voltmetrul un rezistor cu rezistenţa adiţională $R_a = (n-1) \cdot R_V$; fig.3′.6

(Demonstraţie: Aşadar $U = n \cdot U_V$; dar $U = U_{MN} = U_a + U_V$, deci $(n-1) \cdot U_V = U_a$)

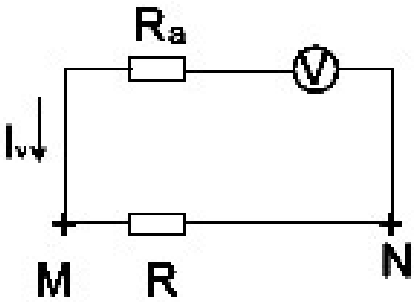


Fig. 3'.6

Cunoaşteţi cauza efectului termic al curentului electric?

(R) La nivel microscopic, circulaţia curentului electric într-un conductor revine la deplasarea ordonată a purtătorilor de sarcină (ioni, atomi), iar pentru conductorii metalici – electronii liberi, care ciocnesc cu ionii reţelei cristaline. După ciocniri inerente, creşte energia internă a conductorului şi implicit, temperatura acestuia. După un timp, temperatura conductorului devine constantă (se spune că s-a atins **regimul termic permanent**). Din acel moment, energia electrică primită *W*, care nu este nici stocată, nici transformată în energie chimică, este transferată mediului exterior sub formă de căldură ($Q = W = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$, conform principiului I al Termodinamicii).

Ce aplicaţii ale efectului termic cunoaşteţi?

(R) Menţionăm funcţionarea unor aparate casnice (grătare, rotisoare, fier de călcat, termoplonjoare, radiatoare etc.); de asemenea,becurile cu filament de wolfram şi argon sau neon (care împiedică evaporarea metalului). Trebuie adăugate

siguranţele fuzibile, care întrerup curentul dacă intensitatea depăşeşte un prag admis.

- Ce efecte negative poate avea efectul termic al curentului electric?

(R) Arderea unor aparate electrice şi distrugerea unor părţi ale diverselor dispozitive datorată încălzirii excesive. De aceea se folosesc ventilatoare pentru calculatoare sau retroproiectoare şi diverse siguranţe.

- În ce constă efectul magnetic al curentului electric?

(R) Öersted a observat că în apropierea unui conductor electric străbătut de curent, acul busolei este deviat. Sarcinile electrice fixe nu au efect magnetic; dar cele mobile, da. Faraday a arătat că şi invers, un câmp magnetic în mişcare poate produce un curent electric.

- Cunoaşteţi deosebirea dintre câmpul electrostatic şi cel magnetic?

(R) În cazul câmpului electrostatic, liniile de câmp „ies" din sarcinile electrice pozitive spre cele negative. Nu există ceva similar în cazul câmpului magnetic, liniile de câmp ale cîmpului magnetic fiind totdeauna curbe închise.

- Ştiţi cum se obţine cel mai simplu electromagnet?

(R) De exemplu, înfăşurăm o sârmă de cupru în jurul unui miez de fier şi îi conectăm capetele la bornele unei baterii electrice.

- Ce este forţa electromagnetică Lorentz?

(R) Cu notaţii standard, $\vec{F} = l \cdot \vec{I} \times \vec{B}$ (produs vectorial), pentru un conductor de lungime l, aşezat între polii unui magnet în

formă de potcoavă „U”; capetele conductorului sunt legate la bornele unei surse de curent continuu şi intensitate *I*, iar $\vec{B}$ este inducţia câmpul magnetic dintre polii potcovei.

Cum acţionează un câmp magnetic asupra unui curent?

(R) Răspunsul tipic este aşa: se aplică „regula mâinii stângi”, anume, câmpul „înţeapă” perpendicular palma plană, curentul are sensul în lungul celor 4 degete întinse (ţinute împreună), iar inducţia este îndreptată în sensul degetului mare, întins lateral. Răspunsul este incomplet...

Să presupunem că într-un punct unde acţionează un câmp magnetic cu inducţia $\vec{B}$ plasăm un curent elementar $Id\vec{r}$.

Atunci câmpul va reacţiona cu forţa Lorentz $d\vec{F} = I(d\vec{r} \times \vec{B})$); fig. 3′.7.

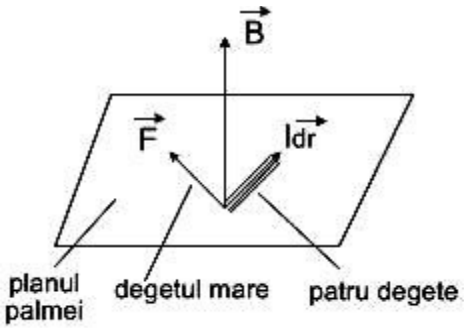


Fig. 3’.7

Încercaţi să determinaţi direcţia şi sensul forţei $d\vec{F}$ care acţionează asupra curentului, într-un câmp magnetic, în situaţiile din figura 3′.8.

(R) Folosim regula mâinii stângi, dar mai bine formula precedentă.

În cazul a) avem $\vec{B} \parallel d\vec{r}$ deci $d\vec{F} = 0$ (câmpul nu acţionează asupra curentului!).

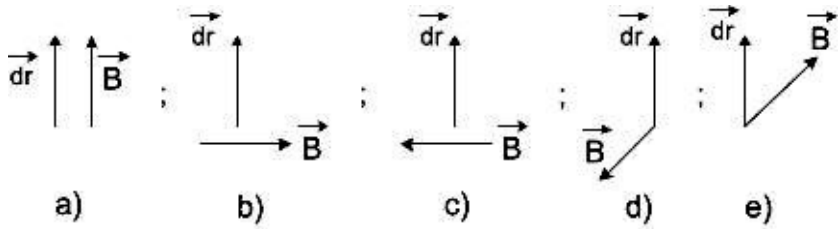


Fig. 3'.8

În cazul b), $d\vec{F}$ este perpendicular pe planul vectorilor $\vec{B}$ şi $d\vec{r}$, cu mărimea $I \cdot B \cdot dr$; c) Opusul vectorului din cazul b); e) opusul rezultatului din cazul d).

Ce este fluxul magnetic şi în ce unităţi SI se măsoară?

(R) Fluxul câmpului magnetic constant $\vec{B}$ printr-un contur plan de arie S este $\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha$, unde α este unghiul dintre $\vec{B}$ şi normala la plan ($\Phi = \vec{B} \cdot \vec{n}$); Φ se măsoară în weberi: 1 Wb=1 $V \cdot s$.

În ce constă fenomenul de inducţie electromagnetică?

(R) Fluxul magnetic este variabil dacă se modifică B, S, α; de exemplu, prin rotirea conturului, se modifică α. S-a constatat că variind fluxul magnetic, se generează curent electric. Dacă avem un contur închis aflat într-un flux magnetic variabil, se generează un curent electric, zis **de inducţie.** Acest fenomen a fost descoperit de Faraday, care a stabilit legea: Dacă $\Phi(t)$ este fluxul magnetic variabil care generează o t.e.m. $\mathbf{E}_i$ într-un circuit electric străbătut de acest flux, atunci $\mathbf{E}_i = -\Phi'(t)$, adică

$\mathbf{E}_i$ este proporţională cu viteza de variaţie a fluxului. Semnul „–” este explicat prin legea Joule–Lenz („curentul indus se opune cauzei care l-a produs, adică tocmai variaţiei fluxului magnetic”).

- Puteţi da un argument pentru legea lui Faraday a inducţiei electromagnetice?

(R) În timpul Δt, conductorul s-a deplasat cu distanţa $v \cdot \Delta t$ şi forţa Lorenz va fi $F = -B \cdot I \cdot l$, care va face lucrul mecanic $\mathfrak{L} = F \cdot v \cdot \Delta t = -B \cdot I \cdot l \cdot \Delta t$. Dar $l \cdot v \cdot \Delta t = \Delta S$ (variaţie de arie) $\Rightarrow \mathfrak{L} = -B \cdot I \cdot \Delta S = -I \cdot \Delta\Phi$.

Pe de altă parte:

$\mathfrak{L} = P \cdot \Delta t = U \cdot I \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta\Phi = -U \cdot \Delta t \Rightarrow U = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$; pentru Δt „mic”, $\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \Phi'(t)$. Într-o bobină cu N spire, $U = -N \cdot \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

- Ştiţi formula care dă inducţia într-un solenoid cu n spire, lungime l, aria spirei S şi străbătut de un curent cu intensitatea I?

(R) $\Phi = n \cdot B \cdot S$; $B = \dfrac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{l}$;

dar $\Phi = L \cdot I$ deci $L = \dfrac{n \cdot B \cdot S}{I} = \mu_0 \cdot n^2 \cdot \dfrac{S}{l}$.

- Ştiţi cum se calculează energia câmpului magnetic creat de un conductor electric? Dar a unui curent electric?

(R) $\Delta E = U \cdot I \cdot \Delta t = L \cdot \dfrac{\Delta I}{\Delta t} = L \cdot \dfrac{1}{2}\Delta(I^2) \Rightarrow E = \dfrac{L \cdot I^2}{2}$.

Apoi $\Delta E = U \cdot I \cdot \Delta t = C \cdot U \cdot \Delta U = C \cdot \frac{1}{2}\Delta(U^2)$ deci $E = \frac{C \cdot U^2}{2}$.

Puteţi explica mai în detaliu fenomenul de autoinducţie?

(R) Să presupunem că printr-un contur trece un curent electric constant. Prin întrerupere, intensitatea curentului variază şi se micşorează rapid, micşorând şi fluxul câmpului magnetic. Conform legii lui Faraday, apare t.e.m. de inducţie (numită acum autoinducţie), iar conform legii Joule – Lenz, sensul acestei t.e.m. este astfel încât se opune cauzei care a condus la micşorarea fluxului magnetic. Rezultă că de fapt curentul de inducţie „de întrerupere" va fi orientat, ca şi curentul avut anterior; ca atare, curentul rezultat poate să crească semnificativ. Evident, la declanşarea (adică la deschiderea întrerupătorului) apare un curent de inducţie de închidere în sens invers curentului de bază şi curentul rezultat se reduce.

În unele contururi, fenomenul de autoinducţie este mai tare şi în altele, mai slab. De exemplu, autoinducţia într-un contur drept este sensibil mai slabă ca într-un solenoid (conductor răsucit în spirală).

Cunoaşteţi principiul de funcţionare a ampermetrului şi voltmetrului?

(R) O bobină–cadru *B* prin care circulă curent electric este suspendată cu un fir metalic *f* între polii unui magnet, solidar cu un ac indicator aflat în faţa unui cadran gradat (fig. 3′.9). Atunci când curentul circulă prin bobină, este generat un câmp magnetic care roteşte bobina–cadru. Rotirea se face cu un unghi

de deviere a acului, proporţional cu intensitatea curentului electric. Se pun şi nişte limitatoare. Ceva similar are loc şi în cazul unui voltmetru, doar că deviaţia acului este proporţională cu tensiunea, nu cu intensitatea.

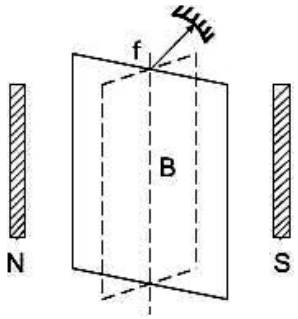


Fig. 3'.9

Puteţi indica principiul de funcţionare a unui motor electric?

(R) Motoarele electrice transformă energia electrică în energie mecanică. Unele motoare funcţionează în curent continuu, pe baza efectului magnetic al curentului. Părţile componente ale unui motor electric sunt: **statorul** (echipament fix, de fapt un magnet fixat pe carcasa motorului); **rotorul** (echipament mobil, format din una sau mai multe bobine, înfăşurat pe un cilindru din fier); **colectorul** (dispozitiv format din două lamele de formă semicilindrică; lamelele sunt izolate una de alta şi sunt legate la capetele firului bobinei, învârtindu-se odată cu bobina).

În timpul rotaţiei, lamelele colectorului fac alternativ contact cu două conductoare fixe, numite **perii colectoare**.

Acestea sunt legate la bornele generatorului de curent continuu (de exemplu, o baterie).

CAPITOLUL 4′: FENOMENE OPTICE

- Ştiţi cam ce procent din informaţiile pe care le primim ne parvin pe cale vizuală?

(R) Peste 80 %. Se spune că o imagine face cât 100 de cuvinte.

- Ce părere aveţi despre expresiile uzuale: „privim la obiecte”, „măturăm cu privirea” etc.

(R) Sunt greşite. Vederea nu este un proces activ. Ceea ce vedem depinde de lumina care ne intră în ochi şi nu sunt raze pe care le-am emite noi. Lumina care trece prin aerul fără particule este invizibilă şi vedem doar lumina care se reflectă de pereţi, de praf, obiecte etc.

- Ce sunt razele de lumină, umbra şi penumbra?

(R) Razele de lumină sunt o noţiune ideală, alese din nenumărate traiectorii. Umbra este o regiune întunecată, neatinsă de lumină, iar penumbra este o zonă aflată în vecinătatea umbrei.

- Dacă vă aflaţi pe o insulă pustie şi aveţi o oglindă plană, cum trebuie să semnalizaţi spre un avion care vă caută?

(R) Normala la oglindă trebuie direcţionată spre semidreapta care uneşte avionul şi Soarele.

- Cunoaşteţi legile reflexiei şi refracţiei?

(R) Considerăm cu notaţii standard, figura 4’.1. (*S*–suprafaţa de separaţie între două medii; *I*–raza incidentă; R_1–raza reflectată; *N*–normala la *S*). Semidreptele *I*, *N*, R_1 sunt situate în acelaşi plan şi $\hat{i} = \hat{r}_1$ (unghiul de incidenţă este egal cu cel de reflexie).

În cazul unor medii diferite cu indici de refracţie diferiţi n_1, n_2, I, N, R_2 sunt situate în acelaşi plan şi $\frac{\sin i}{\sin r_2} = \frac{n_2}{n_1}$ (legea lui Snell).

Reflexia înseamnă „întoarcere” şi refracţia „penetrare şi deviere”.

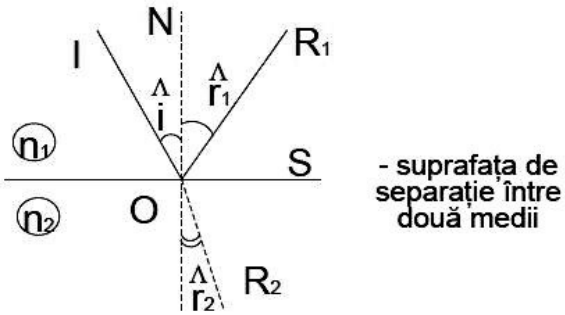


Fig. 4’.1

Ce înseamnă faptul că apa are indicele de refracţie 1,33?

(R) $\frac{\sin i}{\sin r_2} = 1{,}33$.

Ştiţi cum se măsoară indicele de refracţie al unui mediu?

(R) Indicele de refracţie al unui mediu este $n = \frac{c}{v}$ (raportul vitezelor luminii în vid şi prin acel mediu!); $n > 1$. La aer, n=1,001 şi în apă n=1,33. Pe fundul unui vas mai larg plin cu apă (sau alt lichid), se aşează un bec (fig. 4.2).

Există un unghi de incidenţă maxim, când unda refractată face 90° cu normala la $S \Rightarrow$ conform legii lui Snell, $\frac{\sin l}{\sin 90°} = \frac{1}{n} \Rightarrow n = \frac{1}{\sin l}$ şi astfel se determină n.

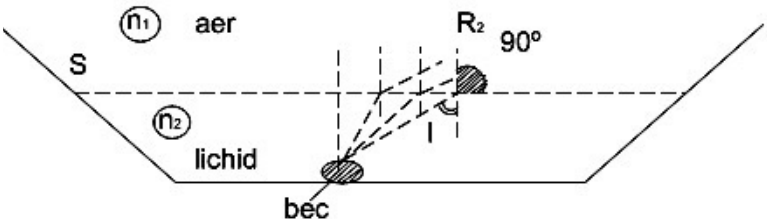


Fig. 4'.2

- Ce este unghiul limită? Dar reflexia totată?

(R) Pentru un unghi de incidenţă mai mare ca l, raza refractată rămâne în mediul lichid (nu mai trece în aer!). Unghiul l se numeşte unghi limită şi fenomenul descris - reflexie totală. Acest fenomen apare când lumina trece de la un mediu cu indice mai mare spre unul cu indice mai mic.

- Ce caracteristică a unei substanţe vă este necesară pentru a determina viteza luminii prin acea substanţă?

(R) Indicele ei de refracţie (din tabele).

- De ce strălucesc bulele de aer din apă?

(R) Pe seama reflexiei luminii la frontiera de separaţie apă/aer.

- De ce scufundat chiar în apă pură, omul nu vede bine?

(R) Razele de lumină se refractă la trecerea din apă în ochi şi nu asigură o imagine bună pe retină.

De ce ziua nu se văd stelele?

(R) Lumina solară împrăştiată prin refracţia atmosferică este mai puternică decât lumina stelelor.

De ce strălucesc pietrele preţioase?

(R) Au loc reflexii interioare multiple ale luminii căzute pe acele pietre. De exemplu, diamantele au un indice mare de refracţie, iar reflexia internă totală este mai mare (în raport cu sticla).

COMPLETARE: **Prezentăm frontierele aplicabilităţii legilor opticii geometrice**.

Ţinând cont de proprietăţile ondulatorii ale luminii, legile opticii geometrice nu pot fi aplicate dacă diametrele obstacolelor sau orificiilor prin care trece lumina sunt prea mici, de ordinul lungimii de undă a luminii.

Acesta este răspunsul standard, dar nu este complet. Există şi limitări ale aplicării legilor opticii geometrice şi în cazul distanţelor mari.

De exemplu, să presupunem că în Cosmos se trimite o rază de lumină, care nu s-ar dispersa. Presupunem că în 1s rotim aparatul ce trimite raza de lumină cu 60°. Se pune întrebarea: cu ce viteză trebuie deplasate printr-o astfel de rotaţie punctele razei care se află la distanţe de aparat mai mari decât 300 000 km? Astfel de puncte s-ar deplasa cu viteze mai mari ca viteza luminii!

Raza de lumină este un flux de fotoni şi cei care „zboară” din aparat până ce este rotit nu ştiu de rotirea efectuată şi îşi continuă mişcarea în direcţia în care au fost emişi. În noua

direcţie, zboară fotoni noi şi ca atare, nu se observă nici o rotaţie a razei de lumină ca întreg. Distanţele trebuie să fie astfel încât timpul necesar luminii pentru a fi parcurse să fie mult mai mic decât timpii caracteristici de tipul timpului de rotire a aparatului care emite raza de lumină. În acest caz, raza ca întreg nu se distruge şi se pot folosi legile opticii geometrice.

- De ce în oglinzile exterioare ale unui autoturism, maşinile se văd mai apropiate decât în realitate?

(R) Oglinzile respective sunt uşor concave.

- Se consideră două oglinzi perpendiculare ca în figura 4′.3.

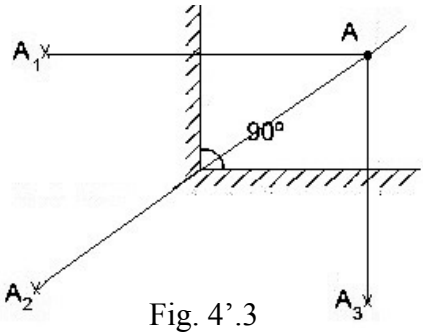


Fig. 4'.3

Câte imagini are punctul *A*?

(R) Trei: A_1, A_2, A_3.

- De ce atunci când ne apropiem de o oglindă privindu-ne în ea, avem impresia că ne mişcăm mult mai repede decât ne mişcăm în realitate?

(R) Fie *A* un punct care se mişcă spre o oglindă plană cu viteza *v* şi *A′* imaginea lui *A* în oglindă. Într-un interval de timp *t*, punctul *A* ajunge în *B* şi *A′* în *B′* (fig. 4′.4). Avem $AB = v \cdot t$ şi $A'B' = v \cdot t$. Dar la momentul *t*=0, distanţa dintre *A* şi imaginea

lui era $AA' = 2 \cdot AO$, iar la momentul *t*, distanţa dintre *B* şi *B'* este $2 \cdot BO$. Deci obiectul a parcurs spaţiul *AB*, iar distanţa dintre obiect şi imagine s-a micşorat cu $2 \cdot AB$. Aşadar, viteza cu care se mişcă imaginea faţă de obiect este de 2 ori mai mare decât viteza cu care se mişcă obiectul faţă de oglindă.

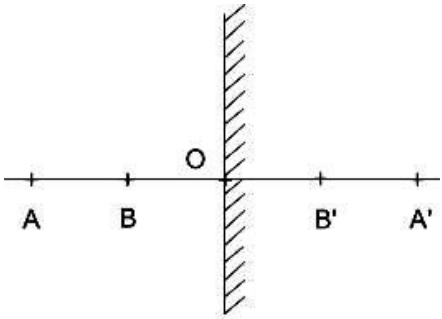


Fig. 4'.4

- Care este rolul oglinzilor curbate?

(R) Produc distorsiuni care măresc unele detalii. De asemenea, redirecţionează lumina; de exemplu, oglinzile parabolice focalizează lumina.

- Care este diferenţa între o imagine reală şi una virtuală?

(R) Lumina converge pentru a forma o imagine reală; o imagine reală poate fi captată pe un paravan, cea virtuală nu, în cazul unei imagini virtuale, nu există lumină la locul formării acelei imagini.

COMPLETARE: Relativ la lentile şi oglinzi sferice – concave sau convexe, formulele aplicabile se împart în două grupe. Explicităm această afirmaţie…

Soluţie: Într-o primă grupă intră cele care leagă distanţa focală F a lentilei (sau oglinzii), distanţa f de la obiect la lentilă (oglindă) şi distanţa d de la imagine la lentilă (oglindă): $\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}$, unde d, f, F nu sunt neapărat pozitive (semnul lor variind de la situaţie la situaţie). Apar trei cazuri:

a) Lentile convergente şi oglinzi concave cu $d>F>0, f>0$ (imaginea este atunci reală);

b) Lentile convergente şi oglinzi convexe şi $d>0, F>0, f<0$ (în acest caz imaginea este virtuală/ imaginară); c) Lentile divergente şi oglinzi convexe cu $d>0, F<0, f<0$ – imagine virtuală/imaginară.

Aşadar, totdeauna $d>0$. Distanţa focală F este pozitivă pentru lentile convergente şi oglinzi concave; F este negativă pentru lentile divergente şi oglinzi convexe.

c) În fine, f este pozitivă pentru imagini reale şi negativă pentru imagini virtuale (≡imaginare). În cazul a), $\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}$; în cazul b) $\frac{1}{d}-\frac{1}{f}=\frac{1}{F}$ şi în cazul c), $\frac{1}{d}-\frac{1}{f}=-\frac{1}{F}$.[Se remarcă analogia dintre lentile şi oglinzile sferice!].

În cea de a doua grupă, se află formulele care leagă distanţa focală a lentilei (oglinzii) de caracteristicile celelalte ale ei.

Pentru **oglindă**, $F = \pm\frac{R}{2}$ (R este raza de curbură a oglinzii; „+” în caz concav şi focar real; „–” în caz convex şi focar virtual).

Pentru lentile, are loc formula:

(*) $\frac{1}{F} = (n-1)\cdot(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$,unde n=indicele de refracţie al materialului din care este confecţionată lentila, iar R_1, R_2 - razele de curbură. (Dacă R se referă la partea convexă a lentilei, se ia „+”; la partea concavă „–”). Lentilele dublu convexe, plan–convexe şi convex–concave sunt convergente, deoarece în formula (*) ele au focar pozitiv.

În fine, dacă lentila se plasează într-un mediu cu indicele de refracţie n_0, atunci formula (*) se modifică astfel: $\frac{1}{F} = (\frac{n}{n_0} - 1)\cdot(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$. Dacă se trece de la un mediu mai puţin dens ($n_0 < n$) la unul mai dens, atunci semnul focarului se modifică şi o lentilă convergentă devine divergentă şi invers.

<u>Ilustrăm cele spuse anterior pe următorul exemplu concret (problemă–tip): Partea convexă a unei lentile plan–convexă cu raza de curbură R şi indicele de refracţie n este argintată. Dacă se obţine o oglindă concavă, să se determine distanţa focală a acelei oglinzi.</u>

<u>Soluţie:</u> Ducem o rază paralelă cu axa optică principală (fig. 4′.5). După ce ajunge la suprafaţa argintată, raza iese din

lentilă şi se refractă. Dacă nu s-ar refracta, ea ar intersecta axa principală la distanţa $\frac{R}{2}$ de oglindă.

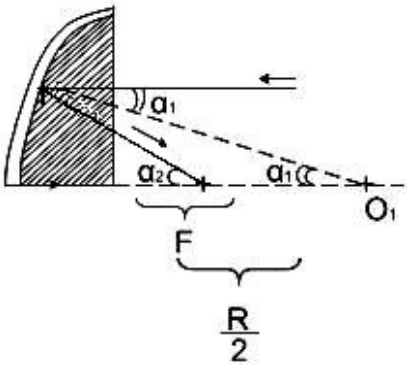


Fig. 4'.5

Dar prin refracţie, va intersecta axa principală ceva mai aproape de oglindă. Notăm cu F distanţa cerută $\Rightarrow \frac{R}{2} \cdot \mathrm{tg}\alpha_1 = F \cdot \mathrm{tg}\alpha_2$. Cum α_1, α_2 sunt „mici”, $\frac{R}{2F} = \frac{\mathrm{tg}\alpha_2}{\mathrm{tg}\alpha_1} \cong \frac{\sin\alpha_2}{\sin\alpha_1} = n \Rightarrow F = \frac{R}{2n}$.

- Un om se apropie de o oglindă plană cu viteza de 3m/s. Cu ce viteză se apropie el de propria lui imagine?

(R) 6 m/s.

- Credeţi că se poate aprinde un foc de tabără, într-o zi cu Soare, cu ajutorul unei bucăţi de gheaţă?

(R) Da, confecţionând din acea gheaţă o lentilă convergentă.

- Ştiţi de ce teoria corpusculară a luminii a fost considerată insuficientă?

(R) Până la 1750, lumina era privită ca având o natură corpusculară (fascicul de particule). Dar nu s-au putut explica fenomenele de difracţie, interferenţă, polarizare. După ce Newton iar mai târziu Maxwell au indicat şi natura ondulatorie, deci dualitatea corpuscul/undă, s-au explicat toate fenomenele legate de lumină.

- Ştiţi de ce în mediu omogen transparent, iluminarea unei suprafeţe cu ajutorul laserului nu depinde de distanţa de la sursa de lucru?

(R) Lumina emisă de laser este formată din raze aproape paralele.

- De ce la definirea corectă a indicelui de refracţie al unei substanţe se foloseşte nu lumina albă ci cea monocromatică?

(R) Undele luminoase se descompun…şi indicii de refracţie ai substanţei diferă pentru componentele luminii. De exemplu, dacă raza de lumină albă trece de la sticlă la aer, raza „roşie" se refractă mai aproape de normală şi cea „violetă" – mai departe. În particular, pentru orice lentilă, distanţa focală principală este mai mare în modul pentru radiaţia roşie.

- Lungimea de undă a luminii roşii în apă este egală cu lungimea de undă a luminii verzi în aer. Ce culoare va vedea un om aflat sub apă dacă este luminat cu lumina roşie?

(R) Roşu (deoarece la trecerea de la un mediu la altul, frecvenţa luminii care determină culoarea razelor nu se modifică!).

- Prin ce diferă văzul de auz?

(R) Urechea noastră poate distinge sunete diferite simultane. Dar ochiul poate percepe o singură culoare în fiecare punct; de

exemplu, dacă roşu şi verde sunt reflectate de un obiect, acel obiect ne apare galben.

- <u>În momentul când Soarele se află la 150 milioane km de Pământ, cât timp îi trebuie unei raze de lumină să atingă Pământul</u>?

<u>(R)</u> Circa 500 s ≅ 8,3 minute.

<u>COMPLETARE</u>:

<u>Explicaţia diverselor culori ale corpurilor din jur.</u>

Toate corpurile din jur sunt iluminate de la Soare. Lumina este o radiaţie electromagnetică şi la întâlnirea ei cu orice substanţă (≡corp), atomii şi moleculele acesteia interacţionează cu radiaţia şi vibrează cu diverse frecvenţe. În cazul când vibraţiile substanţei sunt în rezonanţă cu cele ale undei luminoase, apare o creştere de amplitudine şi de energie transmisă atomilor substanţei, însoţită de **încălzirea** corpului; în acest caz, se spune că lumina a fost **absorbită** de corp.

Undele care nu au intrat în rezonanţă, produc vibraţii cu amplitudini mici şi acestea sunt fie reflectate de substanţă, fie trec prin ea. În cazul când corpul este netransparent, avem doar absorbţie sau reflexie.

Aici este poanta!

<u>Exemplu:</u> Dacă vibraţiile intrate în rezonanţă corespund culorii roşii, acestea sunt absorbite şi, în lumina reflectată, nu mai sunt prezente. Sistemul nostru nervos este construit astfel încât în lipsa culorii roşii să percepem culoarea verde!

Aşadar, culoarea corpurilor netransparente depinde de ce frecvenţe lipsesc din lumina reflectată de acele corpuri.

Explicăm acum ce sunt corpurile negre sau albe.

Există corpuri care absorb toate componentele luminii albe (care intră în rezonanţă cu atomii sau moleculele acelor corpuri); aceste **corpuri** se numesc **negre** termic. Cele pentru care nu există absorbţie se zic albe (de fapt amestecul tuturor culorilor!).

Exemple: 1) Negrul de fum – absoarbe 98 % din lumina căzută pe el.

2) Zăpada este corp negru.

3) O cavitate închisă cu un mic orificiu este un **corp negru**, pentru că lumina ce intră este multiplu reflectată şi iese greu.

COMPLETARE: Cum se vede invizibilul?

(R) Natura (Dumnezeu) ne-a înzestrat cu darul văzului, pentru a vedea lumea înconjurătoare în toate culorile curcubeului. Dar vederea noastră are limite …

- nu putem vedea obiecte foarte mici şi foarte depărtate;

- lungimile de undă din lumina albă pe care le percepem cu ochiul liber se află în intervale 0,4 ... 0,8 μm, deci o mică parte a diapazonului lungimilor de unde electromagnetice din Natură...

Notă: Vulturul zăreşte şoareci la distanţe mari; cucuveaua vede perfect în întuneric; cârtiţa nu vede nimic, nici ziua şi nici noaptea...Oamenii şi-au lărgit percepţia în domeniul

luminii vizibile, anume „vedem” munţi pe Lună, microorganisme. În secolul al XVII-lea au fost inventate microscopul şi telescopul.

În secolul al XX-lea, Fizica cuantică a deschis noi posibilităţi, de exemplu, prin folosirea fotoefectului.

În 1938, olandezul Holst a îmbunătăţit calitatea imaginii foto în condiţii de slabă luminozitate. Iată cum.

Pelicula foto uzuală percepe lumina reflectată de obiectul fotografiat. Dar şi însuşi obiectul este sursă de radiaţie termică, tot electromagnetică.

Lungimea de undă ce corespunde maximului de energie distribuită a acestei radiaţii depinde de temperatură.

La temperaturi foarte mari, corpurile emit în esenţă lumina vizibilă. La temperatura camerei, când are loc fotografierea, maximul în radiaţie este atins în domeniul infraroşu.

Dacă s-ar găsi un mijloc de a transforma această radiaţie invizibilă în unde scurte, sensibilă peliculei foto $\Rightarrow$ se pot fotografia obiecte la lumină slabă şi chiar pe întuneric!

S-a realizat acest lucru prin transformatori opto–electronici. (fig.4′.6).

Elementul de bază este **fotocatodul** (din metale alcaline). Pe fotocatod apare imaginea în infraroşu a obiectului invizibil şi pe anod apare imaginea vizibilă.

Holst a arătat posibilitatea transformării radiaţiei în lungimi mari de undă deci a obiectului invizibil în radiaţii cu lungimi scurte de undă.

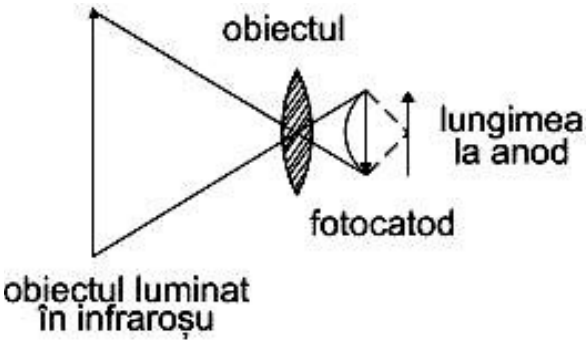


Fig. 4'.6

CAPITOLUL 5′: FENOMENE ONDULATORII

Ce sunt oscilaţiile; ce exemple cunoaşteţi?

(R) Sunt mişcări ale unor corpuri, indiferent de dimensiunea lor, mişcări repetate la diverse intervale de timp. Se cunosc oscilaţii mecanice (deplasări du–te vino, vibraţii ale unei coarde sau ale unei bare, etc.); dar există oscilaţii elastice ale pendulelor, resoartelor, precum şi oscilaţii electrice. Există de asemenea oscilaţii forţate, datorate unor forţe externe (frecări, frânări etc.), cu frecvenţă variabilă.

Ce sunt oscilaţiile armonice?

(R) Au proprietatea că un anumit parametru de stare $x(t)$ urmează o lege de tip sinusoidal, de tipul $x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \alpha)$ cu A>0 amplitudinea, $\omega > 0$ pulsaţia şi α faza. Oscilaţiile armonice sunt periodice cu perioada principală $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$. Un exemplu tipic de oscilaţii armonice îl constituie mişcarea pendulului simplu (matematic).

Notă: Fourier a arătat că orice fenomen periodic în timp se poate reprezenta ca suprapunerea unui şir de oscilaţii armonice având perioade din ce în ce mai mici.

Dar undele?

(R) Pe scurt, acesta sunt vibraţii care se propagă (se deplasează în spaţiu, printr-un anumit mediu. În viaţa zilnică, întâlnim multe tipuri de unde: unde sonore (≡sunete) generate de corzile unei viori sau de vocea umană. Dar există unde radio, TV, unde

luminoase, unde plane generate de o piatră aruncată pe suprafaţa unui lac etc. În Fizică se întâlnesc fenomene ondulatorii subtile, invizibile, în studiul particulelor elementare, razele X, radiaţii termice, etc.

- Puteţi explica, pe exemplul unui resort, noţiunile de echilibru, perioadă, amplitudine, frecvenţă?

(R) Considerăm un resort vertical tras în jos şi apoi eliberat (fig. 5′.1). Forţele elastice readuc resortul la forma iniţială. Din cauza inerţiei, se creează o mişcare oscilatorie „du–te vino”. Agăţând o masă la capătul resortului, există o poziţie de echilibru.

Mişcarea resortului cu greutatea atârnată este periodică de **perioadă** T care este tocmai durata dintre două treceri în acelaşi sens prin poziţia de echilibru (adică durata unui **ciclu**). **Amplitudinea** unei oscilaţii este distanţa maximă în raport cu poziţia de echilibru.

Frecvenţa f este numărul de cicli pe secundă ($f = \frac{1}{T}$).

În practică, din cauza frecărilor, mişcarea resortului nu este periodică şi se opreşte după un timp.

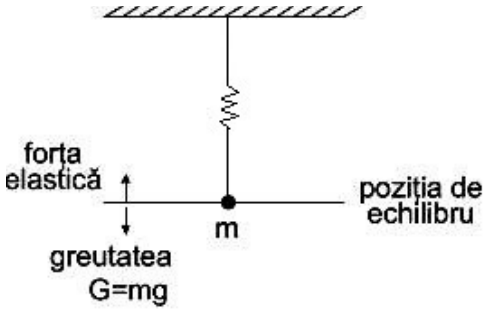


Fig. 5’.1

- Care este unitatea de măsură a frecvenţei? Puteţi da exemple concrete?

(R) 1 Hz = 1 ciclu/s. Se scrie Hz=s^{-1}. Frecvenţa tensiunii casnice de alimentare în România este de 50 Hz; nota „Do” (A4) are 440 Hz. De asemenea. perioada unei oscilaţii având frecvenţa de 10 Hz este $T = \frac{1}{10} = 0{,}1$=0,1 s.

- Cunoaşteţi formula care dă perioada de oscilaţie a unui resort?

(R) $T = 2\pi \cdot \sqrt{m/k}$ (*m*=masa care oscilează, aflată la capătul resortului şi *k*=constanta de elasticitate, dată în tabele pentru diverse materiale). De exemplu, dacă *m*=0,2 kg şi *k*=0,8 N/m, atunci $T = 2\pi \cdot \sqrt{0{,}2/0{,}8} \cong 3{,}14$ s.

- Care sunt forţele care acţionează asupra unui pendul matematic? Dar perioada oscilaţiilor sale mici?

(R) Dacă pendulul (cu masa *m*) este scos din poziţia de echilibru (fig. 5′.2), forţele cerute sunt greutatea $\vec{G} = m \cdot \vec{g}$ şi tensiunea firului $\vec{T}$. Rezultanta lor $\vec{R} = \vec{T} + \vec{G}$ este forţa care restaurează mişcarea.

Perioada oscilaţiilor pentru devierea α sub 5° este independentă de α şi de masa pendulului; ea este dată de celebra formulă a lui Galilei $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, unde *l* este lungimea pendulului. De exemplu, dacă *l*=2 m, atunci $T = 2\pi\sqrt{2/9{,}81} \cong 2{,}8$ s.

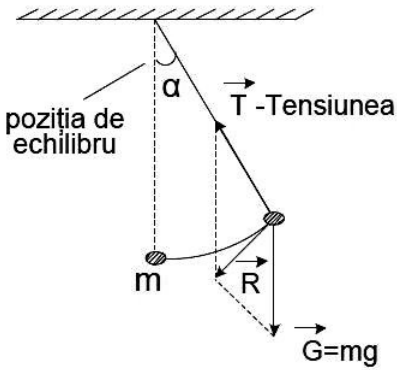


Fig. 5'.2

Notă: Dacă $\vec{R}$ are o mărime foarte mică, pendulul tinde spre poziţia de echilibru, dar inerţia îl face să treacă dincolo.

- Amplitudinea (≡elongaţia maximă α) descreşte în timp din cauza frecărilor. Cum se modifică perioada T de oscilaţie spre atingerea echilibrului?

(R) T nu depinde practic de α pentru valori mici ale lui α.

- Dacă aveţi o pendulă veche în casă şi aceasta merge prea repede, cum se poate ajusta?

(R) Se coboară în mod corespunzător greutatea, pentru a mări lungimea pendulei şi implicit perioada (conform formulei lui Galilei).

- Ştiţi cum funcţionează orologiile digitale sau cele atomice?

(R) Orice oscilaţie periodică poate fi utilizată în construirea de orologii. Orologiile digitale utilizează vibraţiile cristalelor de cuarţ, iar cele atomice folosesc frecvenţele unor tranziţii atomice, cu abateri de secunde în milioane de ani.

- Ce este rezonanţa? Puteţi da un exemplu?

(R) Frecvenţa naturală a unui pendul matematic depinde de lungimea pendulului (conform formulei lui Galilei).

Dacă aplicăm pendulului o forţă suplimentară având aceeaşi frecvenţă (creând condiţii de rezonanţă), se constată **o creştere** a amplitudinii oscilaţiei. (De exemplu, un copil se dă în leagăn şi face mişcări de împingere/pompare cu picioarele în faţă). De asemenea, s-a constatat că dacă pe un pod care vibrează, mai mulţi soldaţi bat pas de front, apare o rezonanţă a podului care poate conduce la prăbuşirea podului, datorată suprapunerii unor oscilaţii de frecvenţe apropiate, crescând amplitudinea oscilaţiei podului.

Ce este lungimea de undă?

(R) Undele generează mişcări de energie (vibraţii) de la un loc la altul, fără deplasări de mase. O sfoară sau o coardă elastică ce se mişcă în sus şi în jos cu frecvenţă şi amplitudine constante, generează un şir de pulsuri de unde, prototip al unei unde periodice. Distanţa dintre orice două poziţii identice vecine ale pulsurilor adiacente (de exemplu, punctele de amplitudine maximă) se numeşte **lungime de undă** λ; fig. 5′.3.

Dacă T este perioada, atunci viteza undei este $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$.

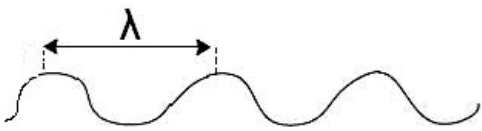


Fig. 5’.3

De exemplu, dacă frecvenţa este f=5 Hz şi λ=8 cm, atunci v=0,4 m/s. Reţinem că lungimea de undă se defineşte riguros doar pentru unde periodice.

- Este posibil să propagăm un puls mic şi unul mare în lungul unei coarde şi acele pulsuri să se suprapună?

(R) Nu, deoarece cele două pulsuri au aceeaşi viteză.

- Dispozitivele sonar civile utilizează sunetele submarine pentru a localiza bancurile de peşte. Undele sonar sunt longitudinale sau transversale?

(R) Sunt longitudinale (adică vibraţiile mediului sunt paralele cu direcţia de propagare şi nu perpendiculare, ca în cazul undelor transversale).

- Se consideră următoarele proprietăţi ale unei unde periodice: frecvenţa, lungimea de undă, viteza, amplitudinea. Care din ele este independentă de celelalte?

(R) Amplitudinea.

- Două unde periodice au aceeaşi viteză şi lungime de undă diferite. Care din ele are o frecvenţă mai înaltă?

(R) Aşadar, $\lambda \cdot f = \lambda' \cdot f'$. Dacă, $\lambda > \lambda'$ atunci $f' < f$.

- Dacă se măreşte frecvenţa unei unde periodice, ce se întâmplă cu lungimea ei de undă? Dar dacă scade perioada?

(R) Presupunem totuşi că viteza undei nu se modifică. În ambele cazuri, λ scade.

- Cât de departe ajunge o undă periodică într-o singură perioadă?

(R) Parcurge distanţa λ, cât lungimea de undă.

- Ce este o undă staţionară? Dar lungimea de undă fundamentală?

(R) O undă care în timp nu îşi modifică profilul (graficul). Lungimea de undă fundamentală este cea mai mare lungime de undă rezonantă pentru o undă staţionară.

- Considerând unda periodică $x=x(t)$, $t\in[0,T]$ cu profilul în figura 5′.4, a) (numită armonică fundamentală), să se indice armonicele a doua şi a treia.

(R) Prototipul este semnalul $x(t)=\sin t, t\in[0,\pi]$; armonica sa de ordin n este $x_n=\sin nt, t\in[0,\pi]$.

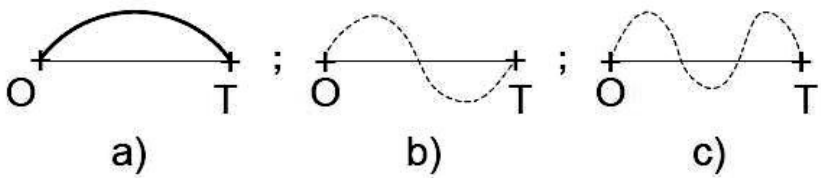


Fig. 5'.4

Nodurile sunt momentele când $x_n(t)=0$ deci $t=\dfrac{k\pi}{n}, 0\le k\le n$ (în număr de n+1).

- Dacă o undă periodică, asimilată cu o armonică fundamentală, are lungimea de undă λ şi frecvenţa f, care sunt lungimea de undă a celei de a n-a armonici şi frecvenţa acesteia?

(R). $\dfrac{\lambda}{n}$, $n\cdot f$.

- Ce este difracţia unei unde periodice?

(R) Printr-un orificiu–barieră, undele nu trec direct ci se „împrăştie” în spatele orificiului; efectul difracţiei depinde de mărimea orificiului şi de lungimea de undă.

- Ce sunt sunetele?

(R) Sunt semnale care se propagă **prin aer** spre urechile noastre, traversând şi alte medii (dar nu prin vid). De exemplu, apropierea unui tren se detecta pe vremuri punând urechea pe şina de cale ferată, după cum vocile din camera alăturată sunt auzite prin pereţi. Obiectele care vibrează fac ca moleculele de aer să execute mişcări du–te vino, presându-ne timpanul şi excitând centrii auditivi.

- Sunetele sunt unde longitudinale sau transversale?

(R) Vibraţiile moleculelor de aer se realizează în aceeaşi direcţie cu mişcarea sunetului , deci sunetul este o undă longitudinală. Sunetele se propagă prin fluide, precum aerul şi apa.

- Ce ştiţi despre viteza sunetului?

(R) Ecoul arată că undele sonore se reflectă de suprafeţe şi că sunetul se propagă cu viteză **finită**. La temperatura aerului de 20°C, viteza sunetului este de 343 m/s≅1235 km/h (la –40°C, viteza sunetului este de 310 m/s). În apă, sunetul se propagă de peste 4 ori mai rapid decât în aer.

- Dacă trimiteţi un semnal sonar drept în jos dintr-o barcă şi trec 3s până la întoarcerea lui, care este adâncimea apei?

(R) Viteza sunetului în apă este $v \cong 340 \times 4 = 1400$ m/s. Dacă adâncimea apei este l, atunci $1400 \times 3 = 2l$, deci $l \cong 2100$ m.

- Dacă tunetul face 10s până la Dv., cât de departe a fost fulgerul?

(R) $340 \times 10 \cong 3{,}5$ km.

- Ce frecvenţe ale sunetului percepe urechea umană?

(R) Între 20 şi 20 000 Hz. O pisică ajunge la 80 000 Hz.

- Ce este decibelul unui număr real r>0?

(R) $r_{dB} = 10 \cdot \log_{10} r$. De exemplu, $1000_{dB} = 30$ şi $0{,}01_{dB} = -20$.

- Ce este intensitatea I a unei unde sonore?

(R) Unda sonoră este propagarea în mediu de comprimări şi rarefieri ale mediului respectiv. Intensitatea I a unei unde sonore este exprimată în W/m^2 şi este energia transferată în 1s printr-o suprafaţă de 1m^2 (aşezată perpendicular pe direcţia de propagare).

Nivelul intensităţii este L=10(12+ $\log_{10} I$), exprimat în decibeli. De exemplu, pentru o conversaţie, $I \cong 10^{-6}$ W/m^2 deci $L \cong 60$ dB şi pentru o bormaşină, $I \cong 100$ dB. Peste 130 dB, sunetul devine insuportabil.

- Ce sunt înălţimea şi timbrul unui sunet?

(R) Înălţimea este legată de frecvenţă, iar timbrul depinde de armonicele suprapuse peste armonica fundamentală. Timbrul este considerat ”amprenta vocii”.

- Ce proprietate a unei unde sonore este determinată de amplitudine?

(R) Intensitatea.

COMPLETARE: Un fenomen supersonic

Dacă zboară un avion uzual, cu viteza jumătate din viteza sunetului, la început auzim sunetul emis de el şi apoi vedem avionul deasupra. La un avion supersonic, este invers şi chiar mai mult, se formează o undă de şoc (explozie, cu spargerea geamurilor).

Explicăm modul cum apare această undă de şoc.

Să presupunem că un avion supersonic zboară cu viteza „Mach 3" (adică de 3 ori mai mare decât viteza sunetului deci de peste 1000 m/s). Considerăm în figura 5′.5 trei poziţii succesive ale avionului. Presupunem că la momentul t_0 avionul se află în punctul *A* şi la momentul $t_1 > t_0$ în punctul *B*; frontul undei sonore din *A* are forma unei sfere mai mari, ca în figura 5′.5,a). La un moment $t_2 > t_1$ avionul este în *C* şi fronturile undelor sonore din *A* şi *B* sunt indicate în figura 5′.5,b) etc. Dacă se suprapun toate undele sonore de la momentul când avionul ajunge în *D*, atunci se obţine un front de undă sonoră de formă tronconică (fig. 5′.c). Pe măsura deplasării avionului, acest front se propagă cu viteza sunetului pe direcţiile indicate prin săgeţi în figura 5′.5,c). Aşa se formează unda de şoc.

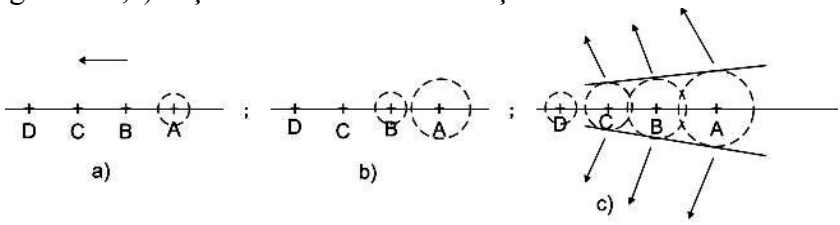


Fig. 5'.5

După ce frontul ajunge la observator, se produce explozia; cu cât viteza avionului este mai mare, cu atât mai îngust este „canalul sonor”.

Notă: În natură nu există fenomene „superluminoase”, deoarece viteza de propagare a undelor luminoase într-un mediu este mult mai mică decât *c*.

- Prin ce diferă muzica de alte sunete?

(R) Răspunsul este dificil şi conţine elemente subiective. Ce este muzică pentru unii, este zgomot pentru alţii. Totuşi muzica se poate considera o succesiune de sunete având diverse caracteristici, inclusiv combinaţii armonice plăcute urechii.

- Presupunem că un avion zboară orizontal cu viteza supersonică $\vec{v}_0$. Un observator aude sunetul de la avion după un timp τ, după care vede avionul deasupra capului. Puteţi afla la ce înălţime *h* zboară avionul?

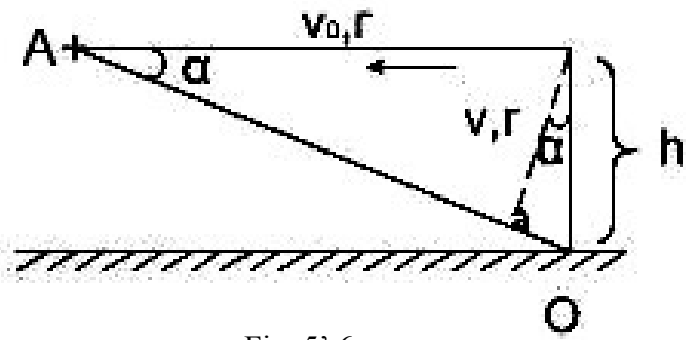


Fig. 5’.6

(R) Să presupunem că observatorul se află în punctul *O* (fig.5′.6). El aude sunetul la momentul când avionul se află în

punctul A. Aşadar, notând cu v viteza sunetului, rezultă $h = \frac{v \cdot \tau}{\cos\alpha}$ şi $\frac{v}{v_0} = \sin\alpha$. Atunci $h = v \cdot \tau \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2}$.

- Ce sunt octavele?

(R) Gama frecvenţelor muzicale este divizată în grupe, numite **octave**. O notă (de exemplu „DO") dintr-o octavă are frecvenţa de două ori mai mare decât nota corespunzătoare („DO") din octava următoare, mai joasă. De exemplu, nota „MI" (≡C) are frecvenţele 262, 524, 1048 Hz în octavele ascendente succesive. În culturile occidentale, octavele sunt divizate în 12 note (7 uzuale – DO, RE, MI,...; 5 „diezi" şi „bemoli").

- Nota muzicală „MI" (≡ middle C) are frecvenţa de 262 Hz; care este perioada ei de vibraţie? Dar lungimea ei de undă?

(R) $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{262} \cong 0{,}004$ s; apoi viteza de propagare în aer este v=340 m/s deci $\lambda = \frac{340}{262} \cong 1{,}3$ m.

- Ce clase de instrumente muzicale cunoaşteţi?

(R) Instrumente de coarde (vioară, violă, bas, violoncel, ghitară); instrumente de vânt (clarinet, trompetă, flaut, nai) şi de percuţie (tobă, xilofon, gong).

- Care armonică este cu o octavă mai înaltă în frecvenţă decât cea fundamentală?

(R) Cea de a doua armonică.

- Dacă frecvenţa fundamentală a unei coarde de chitară este de 220 Hz, care este frecvenţa celei de a 3–a armonice?

(R) 660 Hz.

- De ce masa pe unitatea de lungime a corzilor este mai mare la un contrabas decât la o vioară?

(R) Pentru a produce note mai joase.

- Ce înseamnă fenomenul de „bătăi”?

(R) Suprapunerea (≡interferenţa) a două unde care au frecvenţe apropiate. Este un caz particular de rezonanţă, întâlnit la zgomotul unor conducte.

- Ce sunete se aud atunci când trenul trece de poziţia Dv. fluierând? Ce puteţi spune despre efectul Doppler?

(R) Frecvenţa fluieratului descreşte pe măsură ce trenul se îndepărtează, deci sunetul perceput este mai jos. Efectul Doppler este legat de modificarea frecvenţei unei unde periodice datorită mişcării observatorului sau sursei.

- Ce efecte se iau în considerare la proiectarea unei săli de concerte?

(R) Absorbţia sunetelor şi reflexia lor de pereţi.

- Ce vă spune siajul (≡dâra) unei bărci despre viteza bărcii comparată cu viteza undelor apei?

(R) Viteza apei este mai mare.

- Ce sunt undele de şoc?

(R) Dacă sursa unor unde se deplasează mai repede decât frontul de unde, se creează un „con de şoc”. Fenomenul se întâlneşte,

aşa cum am văzut, la avioanele supersonice şi la unele tipuri de arme.

- Ce ştiţi despre principiul lui Huygens?

(R) Fiecare punct al unui front de undă 3D devine sursă a unei unde aflate în fază cu unda incidentă. Principiul nu are loc şi pentru cazul 2D şi de aceea, antenele TV şi comunicaţiile se realizează în 3D.

- Ce ştiţi despre „figurile Lissajoux”?

(R) În unele consideraţii, se întâlnesc traiectorii 2D ale unui mobil supus unor oscilaţii perpendiculare; traiectoriile respective sunt numite **figuri Lissajoux**. De exemplu, se presupune că mobilul este supus unor oscilaţii armonice suprapuse în lungul axei *Ox* şi în lungul axei *Oy*, cu aceeaşi amplitudine *A* şi frecvenţă.

În plus, presupunem că la momentul iniţial t=0, abaterea de la echilibru pe axa *Ox* este egală cu amplitudinea, iar abaterea pe *Oy* este nulă. Atunci la orice moment $t \geq 0$, poziţia mobilului este: $x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ şi $y(t) = A \sin \omega t$.

Aşadar, $x^2 + y^2 = A^2$ (deci traiectoria mobilului este un cerc). Dar dacă ambele abateri iniţiale erau nule, atunci $y=x$ şi dacă diferenţa fazelor iniţiale era α, cu $\alpha \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, atunci $x(t) = A \cdot \sin(\omega t)$, $y = A \cdot \sin(\omega t + \alpha)$ şi traiectoria ar fi o elipsă.

În general, se obţin curbe complicate, neperiodice, cu autointersecţii.

- Ce ştiţi despre natura ondulatorie a luminii?

(R) De fapt, lumina are o natură duală: flux de particule la plecare şi sosire şi undă pe parcurs. Newton a impus modelul fluxului de particule, dar nu a putut explica difracţia; dar prin modelul ondulatoriu, difracţia a găsit o explicaţie unanim acceptată.

- Ce sunt difracţia şi dispersia luminii?

(R) Sunt fenomene diferite. Difracţia este împrăştierea undelor care trec printr-un orificiu sau în jurul unui obstacol. Dispersia este împrăştierea luminii într-un spectru de culori la traversarea unei prisme optice.

- Ce este holografia? Cum distingem o holoramă de o fotografie?

(R) Imaginea fotografică a unei scene 3D este 2D. Holograma („holo”≡total) este o metodă fotografică ce produce o imagine 3D care are virtual toate proprietăţile optice ale scenei. Holografia a fost concepută de D. Gabor, care a primit premiul Nobel în 1947. Dacă privim holograma din unghiuri diferite, obiectele par că se deplasează unele în raport cu altele.

- Ce este polarizarea luminii?

(R) Este proprietatea luminii sau a oricărei unde transversale manifestată atunci când oscilaţiile ei se află într-un singur plan. De exemplu, lumina reflectată de suprafaţa unui lac este parţial polarizată paralel cu suprafaţa. Undele mecanice polarizate vertical trec printr-o fantă verticală, dar nu printr-una orizontală. Undele longitudinale nu pot fi polarizate.

Ce este luminiscenţa? Dar fluorescenţa?

(R) Pentru a crea lumină, este necesară o sursă de energie. Incandescenţa provine din energie termică la temperaturi înalte. Luminiscenţa este „lumină rece”, emisă la temperaturi normale, prin electroni excitaţi. Fluorescenţa este luminiscenţa unde energia provine de la o radiaţie electromagnetică.

COMPLETARE: Despre curcubeu

Răspunsul tipic este: un arc mare multicolor apărut la orizont, după o ploaie torenţială, cu nori de plumb transportaţi de vânt. Se pun întrebările: când şi cum apare şi ce reprezintă.

Curcubeul poate fi văzut de observatorul *O* doar dacă acesta stă cu spatele la soarele *S* şi dacă în faţa lui *O* se află un nor, iar înălţimea lui *S* deasupra orizontului nu depăşeşte 40° (fig. 5.7.) Curcubeul este o parte din cercul de bază al unui con cu vârful în *O* şi cu axa pe semidreapta *SO*. Centrul cercului este situat sub linia de orizont şi curcubeul nu este un semicerc. O dată cu *O* se deplasează şi curcubeul şi degeaba s-ar duce observatorul *O* spre baza curcubeului.

Curcubeul nu este ceea ce se află într-un anumit loc determinat, ci ceea ce se poate vedea într-o direcţie determinată. Fiecare observator vede propriul lui curcubeu! Partea exterioară superioară a curcubeului are culoarea roşie şi cea de jos – violet, iar între ele se află alte culori.

Norii constau din picături de apă şi fenomenele optice care participă sunt: refracţia luminii la frontiera aer/apă, reflexia la frontiera apă/aer şi dispersia luminii.

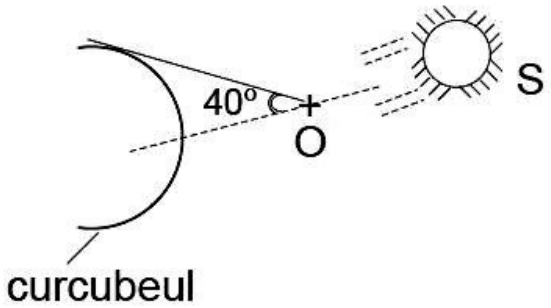


Fig. 5'.7

Milioanele de picături de apă se comportă ca mici prisme pe care cad razele solare, se refractă, se reflectă şi participă la descompunerea (dispersia) imprecisă a luminii în componentele ei. Lumina vizibilă a Soarelui conţine diverse lungimi de undă, de la 700 nm („radiaţia roşie") la 400 nm („radiaţia violet").

Ce este circuitul oscilant al lui Hertz?

(R) Este un circuit electric format dintr-un inductor şi un condensator legate în serie, care generează oscilaţii electromagnetice de înaltă frecvenţă. Hertz a reuşit să confirme teoria lui Maxwell, deschizând era electronicii la sfârşitul secolului al XIX-lea.

Ce este un câmp electromagnetic?

(R) În orice punct al domeniului unde acţionează, câmpul electromagnetic este definit printr-o pereche de vectori $(\vec{E},\vec{B})$, formată dintr-un câmp electric şi unul magnetic, care sunt perpendiculare şi se „autogenerează" reciproc. Liniile sale de câmp sunt traiectorii răsucite şi „îmbârligate".

Ce sunt undele electromagnetice?

(R) Sunt unde care se propagă în aer cu viteza luminii în vid, având lungimile de undă într-un spectru foarte larg. Frecvenţa acestor unde este frecvenţa cu care se deplasează electronii. Maxwell şi Hertz au arătat că lumina şi radiaţiile infraroşii sau ultraviolete sunt de natură electromagnetică. Undele electromagnetice sunt purtătoare de informaţii, după ce sunt modulate pe undele de joasă frecvenţă care conţin informaţiile respective.

Care din undele electromagnetice sunt nocive pentru om?

(R) Radiaţiile gamma şi radiaţiile cosmice; acestea sunt emise în procese de dezintegrare nucleară, în reacţiile termonucleare din stele sau în reactoarele nucleare terestre. Se adaugă razele X (≡Roentgen).

INDICE DE NUME ȘI DE NOTAȚII (vol. I și II)

A

absorbţie **II.102**, *II.233*
acceleraţie **I.47,** *III.12, III.16*
accelerația gravitației **I.58**
acceleraţie medie **I.41**
acomodare **II.131**
acţiune directă **II.11**
acţiune la distanţă **II.11**
acumulator **II.46**
acumulator electric **II.47**
adiabatic **I.133**
admitanță **II.90**
amortizat **II.158**
amper **II.25**
amplitudine **II.149**, *II.238*
amplitudine instantanee **II.158**
anion **II.45**
antenă **II.192**
ardere externă **I.172**
ardere internă **I.173**
armătură **II.35,** *II.211*
armonică fundamentală **II.164**
armonicele coardei **II.164**
ascensională arhimedică **I.111**
autoinducţie **II.73**
axă **I.19**
axă optică **II.105,** *II.116*
axiomă a staticii **I.86**

B

bătaie **II.166**

baterie electrică **II.47**
birefringenţă **II.196**
braţ al forţei **I.99**
busolă **II.60**

C

cadru de curent **II.63**
calorie **I.148**
calorimetru **I.148**
calorimetrie **I.146**
cantitate de electricitate **II.24**
capacitate **II.211**
capacitate electrică **II.35**
capacitate calorică **I.146**
capacitor **II.35,** *II.211*
cation **II.45**
căldură latentă de condensare **I.164**
căldură latentă de topire **I.161**
căldură latentă de vaporizare **I.164**
căldură molară **I.152**
căldură specifică **I.146**
câmp **II.11**
câmp electric **II.17**
câmp electrostatic **II.16**
câmp gravitaţional **I.25**, *II.12*
câmp magnetic **II.62**
câmp scalar **II.12**
câmp vectorial **II.11**
celulă galvanică **II.46**
centripetă **I.48**
centru de greutate **I.104**
ciclic (proces termo-) **I.167**
ciclu **II.238**

ciocniri **I.83**
ciocniri elastice **I.83**
ciocniri plastice **I.84**
circuit de curent alternativ **II.77**
circuit electric **II.26**
circuit oscilant **II.184**
coeficient de frecare **I.55**
coeficient de performanţă **I.170**
colector **II.99**
combustibil **I.147**
componentă scalară **I.31**
concav **II.115**
condensare **I.164**
condensator **I.168,** *II 211*
condensator electric **II.35**
condiție de echilibru **I.102**
conductanţă **II.29**
conducţie **I.249,** *II.196*
conductor **II.23**
conservare în timp **I.75**
conservativ **I.76,** *II.20*
constanta de elasticitate **I.53**
constanta dielectrică **II.212**
constanta gazelor ideale **I.136**
constanta gravitațională **I.56**
constanta magnetică **II.66**
constanta radiativă a corpului negru **II.198**
contact direct **I.53**
contur **II.54**
convecţie **I.249,** *II.196*
convergent **II.121**
convergența **II 129**
convex **II.115**

coordonate carteziene **I.30**
cornee **II.130**
corp negru **II.196,** *II.234*
cristalin **II.131**
cuplu de forţe **I.92**
curcubeu **II.182**
curent alternativ **II.24**
curent continuu **II.24,** *II.209*
curent de deplasare **II.187**
curent de inducţie **II.71,** *II.219*
curent de întrerupere **II.75**
curent efectiv **II.78**
curent electric **II.23,** *II.71*
curent indus **II.71**

D

defazaj **II.85**
defazat **II.149**
densitate **I.52**
densitate curent **II.188**
densitate de volum **I.104**
densitate liniară **I.105**
densitate superficială **I.105**
derivata întâi **I.33**
desublimare **I.166**
diferenţă de fază **II.149**
difracţie **II.102**
dinamometru **I.53**
dioptru **II.105**
dipol **II.27**
disociere electrolitică **II.45**
distanţa **I.53**
distanţă focală obiect **II.109**

distanţă focală-imagine **II.108**
distilare **I.164**
divergent **II.121**
drum parcurs **I.41,** *I.89*

E

echilibru **I.102,** *I.132*
eclipse **II.142**
ecuaţie **I.33**
ecuaţie calorimetrică **I.148**
ecuaţia gazului ideal **I.136**
ecuaţia undelor armonice plane **II.160**
ecuaţia undelor **II.163**
ecuaţie de stare **I.134**
ecuaţie diferenţială **II.151**
ecuaţie parametrică **I.45**
efectuare de lucru **I.151**
efect magnetic al curentului electric **II.60**
eficienţă **I.170**
efort longitudinal **I.206**
efort unitar **I.54**
electrochimie **II.44**
electrod **II.45**
electrolit **II.44**
electroliză **II.45**
electromagnet **II.63**
electromotor **II.98**
electron **II.208**
electroni–volţi **II.47**
element de arc **I.189**
energie **I.73**
energie cinetică **I.73**
energie cinetică medie **I.128**

energie internă **I.150**
energie potentială **I.73**
energie totală **I.73**, *II.156*
explozie **I.173**
expresie analitică **I.31**

F

f.e.m. de autoinducţie **II.74**
factor de putere **II.90**, *II.183*
farad **II.35,** *II.211*
fază iniţială **II.149**
faza undei **II.162**
fierbere **I.130**
figuri Lissajoux **II.250**
flux magnetic **II.69**
flux radiativ **II.197**
focar **II.117**
focar–imagine **II.108**
focar–obiect **II.109**
formulă a lui Boltzmann **I.128**
formulă barometrică **I.107**
formula lui Galilei **II.153**
formula lui Hertz–Thomson **II.86**, *II.186*
formula lui Leibniz – Newton **I.36**
formula opticienilor **II.128**
formulele lentilelor subţiri **II.124**
formulele oglinzii concave **II.118**
forţa **I.49**
forţa electromagnetică **II.69**
forţa electromotoare **II.26**
forţa magnetică **II.66**
forţa de frecare **I.55**
forța de frecare de alunecare **I.55**

forţa de interacţiune **II.15**
forţa elastică **I.53**
fotocatod **II.235**
frecvenţa **II.148,** *II.160, II.238*
frecvenţa unghiulară **II.149**
frontierele aplicabilității legilor opticii geometrice **II.226**

G
gaz real **I.139**
gaz ideal **I.135**
greutate **I.58**

H
hipermetrop **II.132**

I
ideal (fluid) **I.117**
identitatea lui Lagrange **I.30**
imagine **II.113**
imagini reale **II.130**
imagini virtuale **II.114**, *II.130*
impedanţă **II.88**
impedanţa circuitului **II.85**
impulsul unei forțe **I.78**
impulsul unui corp **I.78**
înălţimea sunetului **II.168**
indice de refracţie **II.102**
indice adiabatic **I.158**
inductanţă **II.74**
inducție **II.219**
inducţie magnetică **II.62**
inducţie electromagnetică **II.71**
inerţie **I.50**

infrasunet **II.167**
injecţie **I.173**
instalaţie frigorifică **I.169**
integrala lui f **I.35**
intensitate **II.168**
intensitatea câmpului electrostatic **II.22**
intensitate instantanee **II.25**
intensitate medie **II.24**
interferenţa **II.162**, *II.176*
ion **II.45**, *II.208*
ionizare **II.47**
izobar **I.133**, *I.140*
izocor **I.133**; *I.141*
izolat **I.82**, *I.131*
izoterm **I.133**
înălţimea sunetului **II.168**
încălzirea unui corp **II.233**

L

legea autoinducţiei **II.74**
legea Biot–Savart–Laplace **II.68**
legea Clapeyron Mendeleev **I.136**
legea lui Faraday **II.45**, *II.71*
legea lui Hooke **I.54,** *I.206*
legea lui Joule-Lenz **II.72**
legea lui Lorenz **II.66**
legea lui Ohm **II.29**, *II. 85*
legea pârghiilor **I.91**
lentilă **II.121**
linie de forţă **II.13**
linie de câmp **II.13**
lucru mecanic **I.66**
lucru mecanic elementar **II.18**

lumină vizibilă **II.192**
luneta Kepler **II.140**
luneta astronomică **II.139**
luneta terestră **II.140**
lungime de undă **II.160**, *II.241*
lupa **II.136**

M

manometru **I.114**
mărime fizică **I.17**
mărime rezultantă **I.29**
mărire liniară prin dioptru **II.110**
masă **I.36**, *I.50, I.52*
masă molară **I.122**
masă moleculară **I.122**
maşina termică **I.168**
măsură **I.20**
medie pătratică **II.78**
microundă **II.191**
mişcare armonică **II.149**
mişcare browniană **I.129**
mişcare circular uniformă **I.47**
mişcare curbilinie **I.45**
mişcare în fază **II.174**
mişcare termică **I.127**
mobil **I.187**
modulul lui Young **I.54**, *I.206*
mol **I.121**, *I.229*
moment **I.78**
moment de răsturnare **I. 101**
moment rezultant **I.100**
moment unei forțe **I.99**
motoare în 2 timpi **I.173**

motoare în 4 timpi **I.173**
motor electric **II.98**
motor termic **I.168**

N

nivel de intensitate **II.170**
nivel de referinţă **II.169**
nod **II.54**, *II.163, II.179*
număr de undă **II.162**
număr de decibeli **II.170**
numărul lui Avogadro **I.121**
numerizare **II.202**

O

obiectiv **II.138**
ochelari **II.133**
ochi miop **II.131**
ochi prezbit **II.132**
ocular **II.138**
octavă **II.248**
oglindă **II.112**
oglindă cilindrică **II.121**
oglindă parabolică **II.121**
ohm **II.29**
omogen **I.104**
optică **II.101**
optică geometrică **II.101**
optică ondulatorie **II.101**
optică electronică **II.102**
opus **I.23**
oscilaţie **II.148**
oscilaţie armonică **II.149**
oscilaţie electrică **II.183**

oscilaţie forţată **II.157**
oscilație întreținută **II.157**
oscilaţie liberă **II.157**
oscilaţie periodică **II.148**
oscilație proprie **II.157**
oscilator **II.182**

P

paralel (în) **II.50**
parametru de stare **I.132**
pârghie **I.93**
particulă **II.102**
pendul de torsiune **II.152**
pendul fizic **II.150**
pendul matematic **I.97**, *II.150*
penumbră **II.142**
perie colectoare **II.222**
perioadă **II.148***, II.160, II.238*
perioadă principală **II.148**
permeabilitate a vidului **II.68**
pilă de combustie **II.47**
pixel **II.135**
plan de polarizare **II.195**
plan de vibrare **II.195**
plasmă **II.48**
pol **II.59**
polarizare **II.195**
polarizat liniar **II.195**
politerm **I.182**
polul Nord Magnetic **II.64**
pompă de căldură **I.170**
potenţial electric **II.20**
potenţialul electrochimic al electrodului **II.46**

potenţialul newtonian **II.12**
prag minim de audibilitate **II.169**
presiune **I.65**, *I.128*
presiune normală **I.114**
presiune parțială **I.144**
prima viteză cosmică **I.63**
primitivă **I.36**
principiu **I.86**, *I.245*
principiul „acţio–reacţio” **I.52**
principiul filozofic al lui Le Chatelier **II.72**
principiul inerţiei **I.50**
principiul lui Huygens **II.175**
proces izobar **I.153**
proces izoterm **I.140**
proces izocor **I.153**
proces termodinamic **I.132**
proces politrop **I.159**
produs vectorial **I.27**
produs scalar **I.27**
progresive (unde) **II.163**
proprietăţi principale ale produsului **I.29**
punct – imagine **II.105**, *II.117*
punct – obiect **II.105**
punct de condensare **I.164**
punct de rouă **I.146**
punct de vaporizare **I.164**
punct triplu **I.167**
putere **I.69**, *II.52*
putere activă **II.90**
putere aparentă **II.90**
putere calorifică **I.147**
putere consumată **II.40**
putere instantanee **II.79**

putere a lupei **II.137**
putere medie **II.79**
putere reactivă **II.90**

R

radiaţie infraroşie **II.192**
radiaţie **II.197**
radiaţie termică **II.196**
radiaţie ultravioletă **II.192**
radiator **I.168**
radical **I.21**
ramură **II.54**
randament **I.71**, *I.169*
randamentul unui plan înclinat **I.71**
raport de compresie **I.175**
rată medie **I.33**
rază gamma **II.192**
rază X **II.192**
reactanţă capacitivă **II.82**
reactanţă inductivă **II.83**
reazem în consolă **I.97**
reflexie **II.102**
reflexie totală **II.112**
refracţie **II.102**
refracţie atmosferică **II.146**
regimul termic permanent **II.216**
relaţia lui Gauss – Abbe **II.107**
relaţia lui Mayer **I.153**
relaţia lui Clausius **I.182**
reţea electrică **II.26**
retină **II.131**
rezistenţă **II.29**
rezistivitate **II.33**

rezonanţă **II.85**, *II.158*
rotor **II.99**

S

sarcina electrică **II.14**
sarcina totală **II.24**
scalar **I.24**, *I.40*
schimb de căldură **I.151**
scurtcircuit **II.31,** *II.211*
segment **I.20**
senzaţie sonoră **II.167**
serie (în) **II.49**
siemens **II.90**
sistem **I.131**
sistem termodinamic **I.131**
solenoid **II.61**
solid **I.128**
solidificare **I.163**
solubilitate **I.130**
soluţie **II.44**
spinorial **I.40**
stabil **I.106**
stare gazoasă **I.128**
stare de cădere a corpului **I.210**
stare de magnetizare **II.64**
stare solidă **I.128**
statică **I.86**
staţionar **II.163**
stator **II.99**
sublimare **I.166**
substanţă **II.11**
sunet **II.167**
superconductibilitate **II.33**

suprafaţă echipotenţială **II.21**
sursă de oscilaţii **II.160**
șunt **II.215**

T

temperatură **I.128**
temperatură absolută **I.133**
tensiune **I.60**
tensiune de la borne **II.30**
tensiune efectivă **II.78**
tensiune electrică **II.21**
tensiune electromotoare **II.30**
tensiune interioară **II.30**
tensiune nominală **II.41**
tensorial **I.40**
teorema cosinusului **I.29**
teoremă a condiţiilor de echilibru **I.102**
teoremă a lui Varignon **I.10**
timbru **II.168**
timp de funcţionare **I.174**
tomograf **II.204**
ton simplu **II.168**
topire **I.161**
traiectorie **I.46**
transformare **I.132**
transformare adiabatice **I.158**
transformare izobare **I.155**
transformare izocore **I.154**
transformare izoterme **I.157**
transport energie electrică **II.93**
tranziţie **I.132**
turbogenerator **II.72**

U
ultrasunet **II.167**
umbră **II.142**
umiditate relativă **I.144**
unda **II.102**, *II.147, II.159*
unda coerentă **II.176**
unda electromagnetică **II.190**
unda longitudinală **II.160**
undă radio **II.192**
unda sinusoidală **II.160**
unda sonoră **II.168**
unda subsonică **II.167**
unda transversală **II 160**
unghi **I.20**
unghiu critic **II.112**
unghi de fază **II.149**
uniform **I.42**
uniform accelerat **I.43**
uniform decelerat **I.44**

V
vapori saturaţi **I.144**
vaporizare **I.130**, *I.164*
variaţie de entropie **I.182**
variaţie a energiei cinetice **I.74**
vâscos (fluid) **I.116**
vas comunicant **I.108**
vector (a da un) **I.22**
vector–deplasare **I.188**
vector–deplasare infinitezimală **I.188**
vector (suma) **I.24**
vectorial **I.40**
vector de poziţie **I.24**

vector–acceleraţie **I.47**
vector–viteză **I.47**
vector–viteză unghiulară **I.49**
ventru **II.178**
versor **I.23**
viteză de propagare **II.160**
viteză finită **II.244**
viteză instantanee **I.41**
viteză liniară **I.47**
viteză medie **I.40**
viteză unghiulară **I.47**
volatilitate **I.130**
volum molar **I.123**

W

watt **II.41**
weber **II.70**